



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**MĚŘENÍ PARAMETRŮ HYDRAULICKÝCH SOUSTAV
LETADEL**

MEASUREMENT OF PARAMETERS OF THE AIRCRAFT HYDRAULIC SYSTEMS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Bareš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Karol Bencalík, Ph.D.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Josef Bareš**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Karol Bencalík, Ph.D.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Měření parametrů hydraulických soustav letadel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V letectví se přikládá velký důraz na bezpečnost letecké techniky. Aktuální technický stav letounu a jeho systémů je tedy důležitým parametrem pro jeho letovou způsobilost. Je proto nutné znát a měřit důležité parametry hydraulických soustav letadel.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Určit důležité parametry hydraulických soustav.
- 2) Popsat způsoby měření parametrů.
- 3) Rozvaha nad výběrem vhodných přístrojů pro měření.

Seznam doporučené literatury:

TŘETINA K. Letadlové instalace II, VAAZ, 1986.

PIVOŇKA J. Tekutinové mechanismy, SNTL, Praha 1987.

MOIR I., SEABRIDGE A. Aircraft Systems: Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration, Third Edition, 2008 John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-05996-8.

PAVLOK B. Hydraulické prvky a systémy díl1, Ostrava 2013, ISBN 978-80-248-2983-8.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato práce rešeršní formou sumarizuje dosavadní znalosti měření parametrů hydraulických soustav letadel. V práci je především kladen důraz na návaznost informací a uvedení čtenáře do problematiky parametrů hydraulických soustav a postupech jejich měření. V úvodu se práce věnuje vlastnostem hydraulických kapalin jejich vlivu práci hydraulických soustav. Následně jsou popsány metody i přístroje, které se používají k laboratornímu měření parametrů hydraulických kapalin. Dále se práce přesouvá k tématice provedení hydraulických soustav u letadel, jednotlivých hydraulických zařízení i kapalin, které se v leteckém i obecném provozu hydraulických soustav užívají. K závěru práce je zpracována rozvaha nad výběrem vhodného vybavení laboratoře pro měření parametrů hydraulických kapalin.

ABSTRACT

This thesis summarizes current knowledge of the parameters of hydraulic systems of aircraft. Attention is paid in particular to the continuity of information and the introduction of the reader to the parameters of hydraulic systems issue and the procedures for their measurement. In the introduction the thesis deals with the properties of hydraulic fluids and their influence on the operation of hydraulic systems. Subsequently methods and instruments that are used for laboratory measurement of the parameters of hydraulic fluid are described. Furthermore, the thesis moves on to the topic of hydraulic systems for aircraft, individual hydraulic devices and fluids that are used in the air and for general operation of hydraulic systems. At the end of the thesis a balance sheet is prepared over the selection of suitable laboratory equipment for the measurement of hydraulic fluid parameters.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hydraulické soustavy letadel, hydraulická kapalina, měřicí přístroj, parametry hydraulické kapaliny

KEY WORDS

Hydraulic systems of aircraft, hydraulic fluid, measuring device, parameters of hydraulic fluid

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BAREŠ, J. *Měření parametrů hydraulických soustav letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karol Bencalík, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Karolu Bencalíkovi, Ph.D za vstřícný přístup, cenné rady a připomínky během tvorby bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a přátelům za podporu během studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem. Zpracoval jsem ji samostatně pod vedením pana Ing. Karola Bencalíka, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Bareš Josef

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	VLASTNOSTI HYDRAULICKÝCH KAPALIN	10
2.1	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	10
2.1.1	HUSTOTA	10
2.1.2	VISKOZITA	10
2.1.3	STLAČITELNOST	12
2.1.4	TEPLOTNÍ ZMĚNA OBJEMU KAPALIN	15
2.1.5	MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA	15
2.1.6	BOD TUHNUTÍ	16
2.1.7	MAZACÍ SCHOPNOST	16
2.1.8	PĚNIVOST KAPALIN	17
2.1.9	BOD VZPLANUTÍ	17
2.2	CHEMICKÉ VLASTNOSTI	18
2.2.1	OXIDAČNÍ STÁLOST	18
2.2.2	ČÍSLO KYSELOSTI	18
2.2.3	KOROZIVNÍ PŮSOBENÍ NA KOVY	18
2.2.4	SNÁŠENLIVOST S ELASTOMERY	19
3	ZPŮSOBY MĚŘENÍ	20
3.1	MĚŘENÍ HUSTOTY	20
3.1.1	PYKNOMETRICKÁ METODA	20
3.1.2	METODA PONORNÉHO TĚLÍSKA	21
3.2	MĚŘENÍ VSKOZITY	23
3.2.1	KAPILÁRNÍ VSKOZIMETRY	24
3.2.2	VÝTOKOVÉ VSKOZIMETRY	27
3.2.3	TĚLÍSKOVÉ VSKOZIMETRY	30
3.2.4	ROTAČNÍ VSKOZIMETRY	35
3.2.5	VIBRAČNÍ VSKOZIMETRY	39
3.3	MĚŘENÍ PĚNIVOSTI	42
3.4	MĚŘENÍ BODU TUHNUTÍ	42

3.5	MĚŘENÍ MAZACÍ SCHOPNOSTI.....	42
3.6	MĚŘENÍ BODU VZPLANUTÍ	44
3.7	MĚŘENÍ OXIDAČNÍ STÁLOSTI	45
3.8	MĚŘENÍ ČÍSLA KYSELOSTI.....	46
3.9	MĚŘENÍ KOROZIVNÍHO PŮSOBENÍ.....	47
3.10	MĚŘENÍ SNÁŠENLIVOSTI S ELASTOMERY	47
3.11	MĚŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ HYDRAULICKÝCH KAPALIN.....	47
3.11.1	MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	48
4	HYDRAULICKÉ SOUSTAVY LETADEL.....	51
4.1	ŘEŠENÍ HYDRAULICKÉHO OBVODU.....	51
4.2	HYDROGENERÁTORY	54
4.2.1	ZUBOVÉ HYDROGENERÁTORY.....	55
4.2.2	PÍSTOVÉ ROTAČNÍ HYDROGENERÁTORY	57
4.3	HYDRAULICKÁ NÁDRŽ	59
4.4	TECHNICKÝ STAV KAPALINY	60
5	PRACOVNÍ KAPALINY	61
5.1	PŘEHLED POUŽÍVANÝCH PRACOVNÍCH KAPALIN	61
5.2	MINERÁLNÍ OLEJE	61
5.3	TĚŽKOZÁPALNÉ KAPALINY	63
5.4	EKOLOGICKY PŘÍZNIVÉ KAPALINY	65
5.5	OLEJE V LETECTVÍ.....	66
6	VÝBĚR LABORATORNÍHO VYBAVENÍ.....	69
6.1	VOLBA VISKOZIMETRU	69
6.1.1	HÖPPLER C.....	69
6.1.2	SV-10	70
6.1.3	HÖPPLER KD 3.1.....	71
6.1.4	ZHODNOCENÍ.....	71
6.2	VOLBA HUSTOMĚRU	72
6.2.1	LABORATORNÍ HUSTOMĚR	72
6.2.2	DENSITO 30PX	74
6.2.3	ZHODNOCENÍ.....	74

6.3	VOLBA PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ KAPALIN	75
6.3.1	FCU 2010	75
6.3.2	SPECTRO LNF Q200	76
6.3.3	OPCOM II	77
6.3.4	ZHODNOCENÍ.....	78
7	ZÁVĚR.....	79
8	ZDROJE.....	81

1 ÚVOD

Tématem této bakalářské práce je měření parametrů hydraulických soustav letadel. Hydraulické systémy jsou důležitou kapitolou v letectví již od počátku 30. let minulého století. Od té doby, kdy byl zveřejněn první hydraulicky ovládaný podvozek se počet aplikací hydrauliky v letecké dopravě značně zvýšil.

Využití hydrauliky v letadlech je oblíbené zejména kvůli schopnosti plynulého a spolehlivého ovládání řídicích ploch letadla i dalších částí nezbytných k bezpečnému provozu letadla ve vzduchu i na zemi. K zajištění plynulého provozu hydraulických obvodů volíme hydraulickou kapalinu s vhodnými parametry pro provoz navržené soustavy. Protože jsou na hydraulické kapaliny vyvíjeny tak vysoké nároky, je vhodné je zkoumat ve specializovaných laboratořích a předcházet tak možným rizikům, které by i nepatrná závada kapaliny mohla přivést.

Cílem je definovat všechny měřitelné parametry hydraulických systémů, fyzikální i chemické, popsat metody a přístroje, kterými je můžeme měřit a na závěr provést rozvahu nad měřicími přístroji, které jsou k zakoupení na současném trhu, a vybrat vždy tu nejvhodnější alternativu jako výbavu laboratoře na měření parametrů hydraulických kapalin.

2 VLASTNOSTI HYDRAULICKÝCH KAPALIN

2.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI

2.1.1 HUSTOTA

Dříve bývala jedním z nejdůležitějších fyzikálních parametrů pro rozeznávání různých druhů tlakových kapalin. Dnes je již možno ovlivnit velikost hustoty olejů rafinací, pozbývá proto svého původního významu. Je definována vztahy:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

ρ	hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
m	hmotnost [kg]
V	objem [m^3]

Hustota závisí také na tlaku i teplotě. Se zvyšujícím tlakem se zvyšuje, se snižující se teplotou se snižuje.

$$\rho = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)]^{-1} \quad (2.2)$$

ρ_0	hustota při teplotě T_0 [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
α	součinitel teplotní objemové roztažnosti [K^{-1}]
T	termodynamická teplota [K]
T_0	počáteční termodynamická teplota [K]

Přehled:

voda	$\rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
minerální oleje	$\rho = 800 \div 950 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
HFC	$\rho = 1040 \div 1090 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
[1], [3], [4]	

2.1.2 VSKOZITA

Viskozita je projevem vnitřního odporu částic proti vzájemnému posuvu, neboli projevem vnitřního tření kapalin. Na stykových plochách vrstev s různou rychlostí vzniká tečné (smykové) napětí, které je dle Newtonova zákona lineárně úměrné gradientu rychlosti ve směru kolmém na pohyb kapaliny.

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot D \quad (2.3)$$

τ	smykové napětí [Pa]
η	dynamická viskozita [Pa · s]
D	gradient rychlosti ve směru y [s^{-1}]

Součinitel úměrnosti je dynamická viskozita η , která charakterizuje vnitřní tření a ztráty kapaliny. Je závislá na teplotě a tlaku. Častěji však bývají hydraulické kapaliny popsány kinematickou viskozitou ν , která je definována vztahem:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.4)$$

ν	kinematická viskozita [$m^2 \cdot s^{-1}$]
-------	--

Starší jednotkou kinematické viskozity je stok [$cm^2 \cdot s^{-1}$], platí $1 \text{ cSt} = 1 \text{ mm}^2 \cdot s$.

Závislost viskozity na teplotě:

Vlivem změny teploty se zásadně mění i viskozita kapalin, v důsledku toho bychom měli této problematice věnovat dostatek pozornosti. Při práci hydraulických mechanismů dochází k zahřívání pracovních částí i samotné kapaliny a viskozita klesá. Snížení viskozity může mít za následek:

- s klesající viskozitou klesají tlakové ztráty (kapalina klade menší odpor při průtoku)
- s klesající viskozitou rostou průtokové ztráty (unikání kapaliny těsněním a spoji)
- s klesající viskozitou se zhoršuje mazání

Závislost viskozity na teplotě lze aproximovat vztahem:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{-a \cdot (T - T_0)} \quad (2.5)$$

η_0	dynamická viskozita [Pa · s] při teplotě T_0 [K]
a	parametr závislý na druhu kapaliny [K^{-1}]

Viskózní index:

Viskózní index vyjadřuje míru změny viskozity v závislosti na teplotě. Je to poměrné číslo, které charakterizuje změnu viskozity s teplotou v porovnání s dvěma standartními oleji o indexech 0 a 100. Čím je index vyšší, tím je viskozitní křivka plošší, tím jsou menší změny viskozity s teplotou. Dnes se u minerálních olejů požaduje viskózní index minimálně 90.

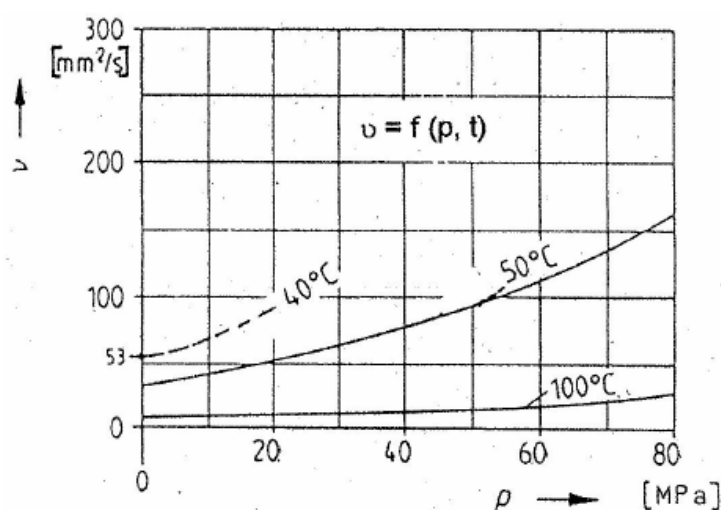
Závislost viskozity na tlaku:

Viskozita se mění i v závislosti na tlaku, se zvyšujícím se tlakem se zvyšuje i viskozita. Tato vlastnost se projevuje především při nižších teplotách a vyšších tlacích nad 100 MPa.

Závislost viskozity na tlaku lze aproximovat vztahem:

$$\eta = \eta_0 \cdot e^{b \cdot (p - p_0)} \quad (2.6)$$

p	tlak [Pa]
p ₀	počáteční tlak [Pa]
η ₀	dynamická viskozita [Pa · s] při tlaku p ₀ [Pa]
b	parametr závislý na druhu kapaliny a její teplotě [Pa ⁻¹]



Obrázek 2.1 - Závislost viskozity minerálního oleje HLP 46 na tlaku a teplotě [3]

Jeden z možných vlivů na změnu viskozity stávající se běžně v praxi, může mít tzv. **hnětení kapaliny**. S tímto jevem se můžeme setkat např. při škrcení minerálního oleje v hydraulické soustavě. Prudkou změnou tlakového spádu nebo dlouhodobým používáním oleje za vysokých tlaků dochází ke změnám molekulární struktury kapaliny, společně se snížením viskozity i mazací schopnosti. [1], [2], [3], [5], [6], [7]

2.1.3 STLAČITELNOST

Stlačitelnost je schopnost kapalin zmenšovat svůj objem při zvýšení tlaku. Jedná se o důležitou vlastnost tekutin a mělo by se s ní počítat jak při návrhu, tak i provozu hydraulických mechanismů. Obvykle je vyjádřena pomocí izotermického modulu objemové stlačitelnosti:

$$K = -V \cdot \frac{dp}{dV} \quad (2.7)$$

K izotermický modul objemové roztlačnosti [Pa]

dp změna tlaku [Pa]

dV změna objemu [m³]

Stlačitelnost může být však vyjádřena i pomocí součinitele objemové stlačitelnosti:

$$\beta_p = \frac{1}{K} \quad (2.8)$$

β_p součinitel objemové stlačitelnosti [Pa⁻¹]

Přehled:

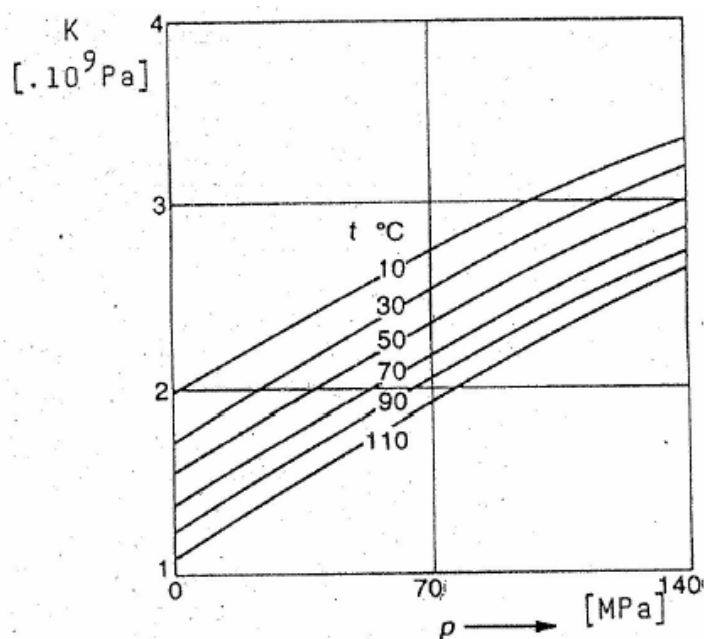
voda $K = 2 \cdot 10^9$ Pa

HFD $K = 2 \cdot 10^9$ Pa

minerální oleje $K = (1,4 \div 1,8) \cdot 10^9$ Pa

HFC $K = 3 \cdot 10^9$ Pa

Modul stlačitelnosti se mění v závislosti na teplotě a tlaku. Tato závislost je uvedena v Obr. 2.2.



Obrázek 2.2 - Závislost modulu stlačitelnosti minerálního oleje HLP 46 na teplotě a tlaku [3]

Nejvýraznější vliv na změnu stlačitelnosti má však obsah volného vzduchu v kapalině, jenž výrazně snižuje modul objemové stlačitelnosti β_p . To se může projevit nebezpečnou pulzací tlaku

v obvodu. Atmosférický vzduch se rozpouští v kapalině na rozhraní fází (vzduch-kapalina) a dochází k vzniku drobných bublin v pracovním médiu. Daný jev se nazývá **aerace**. Jelikož rozpouštění vzduchu probíhá mnohem pomaleji než jeho uvolňování, bubliny pokračují společně s kapalinou do hydrogenerátoru, kde vlivem kavitace dochází k opotřebením pracovních částí mechanismu.

Množství rozpuštěného plynu v pracovním médiu zjistíme pomocí vztahu:

$$V_p = V_K \cdot \alpha_p \frac{p}{p_0} \quad (2.9)$$

V_p	objem rozpuštěného plynu [m ³]
V_K	objem kapaliny [m ³]
α_p	součinitel rozpustnosti v kapalině [–]

Při velkém poklesu tlaku pod hodnotu atmosférického dochází k velkému uvolnění plynu do kapaliny a vzniká jejich vzájemná emulze. To má jistě vliv i na změnu barvy, která z původní plynule přechází k žluté až bílé. Vzduch se dostává do kapaliny obvykle při údržbě (např. při výměně filtrů, filtračních vložek).

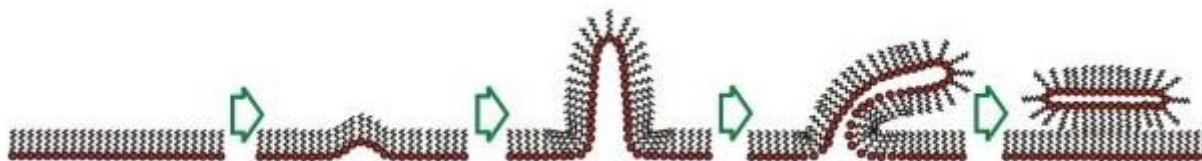
Závislost vlivu cirkulujícího vzduchu v hydraulickém obvodu na modul objemové stlačitelnosti se dá aproximovat vztahem:

$$K = K_0 \cdot \frac{1 + \frac{V_p}{V_K}}{1 + \frac{p_0}{p} \cdot \frac{V_p}{V_K} \cdot \frac{K_0}{p}} \quad (2.10)$$

K_0	modul stlačitelnosti kapaliny bez volného vzduchu [Pa]
V_K	objem kapaliny ve směsi se vzduchem při tlaku p_0 [m ³]
V_p	objem plynu ve směsi při tlaku p_0 [m ³]
p	tlak směsi kapaliny se vzduchem [Pa]
p_0	atmosférický tlak [Pa]

Dříve byly hydraulické systémy letadel dimenzovány na provozní tlaky o velikosti přibližně 10-20 MPa a kladl se důraz především na nízkou hmotnost komponent. Se zvyšujícími nároky na provoz letadel a studii hydraulických soustav je snaha o posunutí původních standardů, dle představ by měly soustavy pracovat při tlacích 35-55 MPa za současného udržení či dokonce snižování hmotnosti i objemů zařízení.

Výjimkou mezi moderními hydraulickými kapalinami je olej DTD 585, který se může provozovat pouze do tlaků nižších 35 MPa kvůli vysokým stříhovým napětím v mazacím filmu, jež mohou způsobit až tzv. **zhroucení filmu**. [3], [5], [8], [14], [28]



Obrázek 1 - Zhroucení mazacího filmu [28]

2.1.4 TEPLOTNÍ ZMĚNA OBJEMU KAPALIN

Tekutiny mění svůj objem v závislosti na změně teploty a míru této změny lze v praxi vyjádřit pomocí součinitele teplotní objemové roztažnosti α . Ten nám udává zvětšení objemu kapaliny při zvýšení teploty o 1 teplotní stupeň.

$$\alpha = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \quad (2.11)$$

α součinitel teplotní objemové roztažnosti [K^{-1}]

Zajímá-li nás změna objemu po ohřátí určitého média o teplotní změnu ΔT :

$$V = V_0 \cdot (1 + \alpha \Delta T) \quad (2.12)$$

T teplotní změna [K]

Přehled:

voda	$\alpha = 1,5 \cdot 10^{-4} K^{-1}$
synt. oleje	$\alpha = 9,5 \cdot 10^{-4} K^{-1}$
minerální oleje	$\alpha = 7 \cdot 10^{-4} K^{-1}$

Praktický význam této veličiny oceníme především při dimenzování nádrží. [1], [3]

2.1.5 MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA

Pro ohřev různých látek se stejnou hmotností na stejnou teplotu je zapotřebí různého množství tepla. Tato schopnost látek přijímat teplo Q se dá vyjádřit pomocí veličiny jménem tepelná kapacita C . Pokud tuto veličinu vztahujeme na jednotku hmotnosti, bavíme se o měrné tepelné kapacitě, která by se dala definovat jako množství tepla, které musíme dodat 1 kg látky pro ohřátí o 1 teplotní stupeň.

$$c = \frac{dW}{m \cdot dT} \quad (2.13)$$

c	měrná tepelná kapacita [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
dW	změna vnitřní (tepelné) energie [J]
dT	změna teploty [K]

Měrná tepelná kapacita se mění v závislosti na teplotě, závislost na tlaku je zanedbatelná. Její praktický význam je v ovlivňování časové konstanty oteplování nebo ochlazování hydraulických obvodů nebo se také využívá u výpočtů výměníků tepla.

Přehled:

voda	$c = 4180 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
synt. oleje	$c = 3000 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
minerální oleje	$c = 1850 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

[1], [3], [5]

2.1.6 BOD TUHNUTÍ

Látka vyznačující se pevných bodem tuhnutí je voda, některé látky např. oleje však tuhnou postupně. To znamená, že se snižující se teplotou roste viskozita až k hodnotám, kde tekutina přestává téci úplně ($1 m^2 \cdot s^{-1}$), tuto teplotu označujeme jako nepravý bod tuhnutí. Častěji se udává teplota, při které je kapalina právě ještě v tekoucí formě, tento bod nazýváme jako **pour point** a leží v rozmezí 6 až 8°C nad bodem tuhnutí.

Bod tuhnutí u minerálních olejů ovlivňuje především zbytkový parafin, který se snižující se teplotou krystalizuje jako první, syntetické oleje jsou vůči snižující se teplotě náchylnější méně. Abychom předešli tuhnutí olejů, můžeme jejich strukturu pozitivně upravovat pomocí přísad zvaných **depresanty**.

Nejnižší povolenou provozní teplotu určíme pomocí tzv. startovací viskozity, kterou vždy uvádí výrobce pro daný typ hydraulického zařízení (hydrogenerátoru). Tato teplota by neměla klesnout pod teplotu 8°C nad bodem tuhnutí, jinak hrozí výrazné ovlivnění pracovní kapaliny. [3], [5]

2.1.7 MAZACÍ SCHOPNOST

Je to schopnost kapalin vytvořit na kluzné ploše tenkou, souvislou a pevnou vrstvu, jež odděluje třecí plochy i při vzájemném kontaktu. Tato ochranná vrstva se nazývá mazací film a ne každá kapalina je schopna tento film vytvořit (např. voda).

Oleje jsou tvořeny polárními molekulami (většinou molekulami uhlovodíků), které se přichytávají na kluznou plochu a vytvoří tak tenkou vrstvu molekul maziva. Tento jev nazýváme

fyzikální adsorbce. Adsorbovaná vrstva o tloušťce jedné molekuly má vysokou smykovou pevnost a zajišťuje oddělení třecích ploch i při jejich vzájemném kontaktu.

Cílem mazání je oddělit kluzné plochy takovou vrstvou maziva, aby se vrcholky povrchových nerovností za vzájemného pohybu nesetkávaly a aby mohlo vzniknout tzv. kapalinné tření. Toto tření vzniká vždy za přítomnosti jakékoliv kapaliny při vzájemném pohybu dvou ploch a velikost třecích sil závisí na viskozitě kapaliny. Vlivem zvyšování přitlačné síly dochází k zmenšení prostoru mezi kluznými plochami a vytlačování maziva, čímž tření přechází z kapalinného na smíšené, mezní až na suché (kov na kov).

Pro běžná hydraulická zařízení, která pracují za nízkých a středních tlaků, si vystačíme přirozenou mazací schopností minerálních olejů. U vyšších tlaků je třeba použít olejů s přísadami podporujících mazací schopnosti. Tyto přísady se běžně označují jako mazivostní či protioděrové, a mají za cíl snížit tření a opotřebení kluzných ploch. V případě extrémního smykového namáhání a vysokých tlaků se do olejů přidávají protiotěrové (vysokotlaké resp. EP) přísady, které obsahují chemické sloučeniny s obsahem síry a fosforu typu ZnDDF (zinkdialkyldithiofosfát), které mají antikoroziní účinky. [2], [5], [6]

2.1.8 PĚNIVOST KAPALIN

Jedním z velmi nežádoucích jevů ovlivněných vzduchem je pěnivost. Projevuje se zejména zmenšením pevnosti mazací vrstvy, poklesem viskozity, hustoty i tepelné vodivosti, zvětšením náchylnosti oleje ke stárnutí a následným snížením výkonu hydrogenerátoru, zvětšením ztrát apod.

Souvisí s povrchovým napětím pracovního média vůči vzduchu, který se rozpouští v oleji a v místech s nižším tlakem se vylučuje ve formě malých bublin. K tomu přispívá ještě nasávání vzduchu způsobené špatnou konstrukcí hydraulického zařízení (netěsnosti potrubí, zlá konstrukce nádrže, zlé vyústění odpadového potrubí nad hladinu oleje). Na zvětšené pění může mít vliv také vlhkost. Větší sklon k pění mají obecně oxidačně zestárlé oleje, u kterých je vylučování vzduchu pomalejší, a oleje s vyšší viskozitou.

U moderních hydraulických zařízení se často používá přísad zamezujících pění tzv. protipěnivostní přísady. Používají se především polysiloxany, jež jsou účinné již ve velmi malých koncentracích. Umí zabránit nejen tvoření pěny, ale také rozrušovat již pěnu vytvořenou. [1], [3], [5], [6], [18]

2.1.9 BOD VZPLANUTÍ

Hořlavost hydraulických kapalin může být klasifikována bodem vzplanutí (tzv. **flash point**). Jedná se o teplotu, při které se po přiblížení plamene na krátkou chvíli vznítí hořlavé páry, ale kapalina nezačne trvale hořet. Dle norem ČSN i zahraničních se hořlavé kapaliny dělí do čtyř skupin hořlavosti viz. Tab. 2.1.

Tabulka 2.1 – Třídy nebezpečnosti hořlavých kapalin [5]

Třída	Bod vzplanutí kapalin	Příklad
I.	do 21°C	aceton – 18°C, benzín -8°C, etylalkohol +12°C
II.	nad 21°C do 55°C	petrolej 25°C, nafta (Diesel) 55°C
III.	nad 55°C do 100°C	topný olej
IV.	nad 100°C	hydraulické oleje

Bod vzplanutí se u hydraulických kapalin pohybuje asi v rozmezí 95÷250°C. Většina z nich má svůj bod vzplanutí až nad teplotou 125°C, proto je můžeme řadit do IV. třídy nebezpečnosti kapalin. [3], [5], [6]

2.2 CHEMICKÉ VLASTNOSTI

2.2.1 OXIDAČNÍ STÁLOST

Oxidační stálost (též termooxidační stálost) je schopnost kapaliny odolávat negativním účinkům kyslíku, chemických látek a energií (tepla, světla i záření). Působením těchto jevů by se mohlo projevit tzv. **stárnutím kapaliny**. To může vést až k změně původního chemického složení oleje (kyslík se váže na řetězce uhlovodíků). V něm pak vznikají látky kyselého charakteru, což je projevem oxidace a látky charakteru živcového, které se projevují vznikem olejového kalu, mazlavých a lepkavých látek. V hydraulických soustavách, kde je olej vystaven vlivu vysokých teplot se navíc tvoří i asfaltovité částice plastického či tvrdého charakteru, které mohou zalepit filtry, ventily, chladiče či vážně poškodit hydraulický mechanismus. [3], [5], [6]

2.2.2 ČÍSLO KYSELOSTI

Číslo kyselosti udává stupeň oxidačního zestárnutí hydraulického média, které společně se změnou viskozity a mírou znečištění je kritériem pro hodnocení kvality oleje a jeho následnou výměnu. Číslo kyselosti se udává v mg hydroxidu draselného KOH (na 1 g zkoušeného oleje). [6]

2.2.3 KOROZIVNÍ PŮSOBENÍ NA KOVY

Při používání různých hydraulických kapalin můžeme očekávat odlišné chování vůči pracovním povrchům mechanismů. Dle norem se zaměřujeme především na hodnocení působení kapalin na ocel a měď.

Voda, vodní emulze a její roztoky mají na ocel (konstrukční, uhlíkové či s nízkým obsahem legur) korozivní účinky. Musíme je tedy mísit s tzv. **inhibitory koroze**. To jsou látky, které chemicky reagují s kovovým povrchem a vytvoří na něm ochrannou vrstvu, bránící vzniku a následnému pronikání koroze do hloubky. Opakem jsou minerální oleje, které nejenže nepůsobí na kovy korozivně, disponují dokonce ochrannou schopností zabráňující vlhkosti působit na

ocelové povrchy. Tato vlastnost může být negativně ovlivněna zejména vlhkostí pronikající do oleje kondenzací ze vzduchu, vadným těsněním či únikem z chladiče. Tomu můžeme předejít přidáním antikoročních přísad do oleje, a dále přísad deemulgačních, které brání tvoření emulze. [3], [6]

2.2.4 SNÁŠENLIVOST S ELASTOMERY

Působením kapaliny na elastomery (hadice, těsnění, apod.) může docházet k jejich smršťování, nabobtnávání nebo dokonce rozkladu. Minerální olej způsobuje dvě protichůdné reakce elastomerů. Olej difunduje do materiálu, což způsobuje nabobtnávání materiálu – zvětšování objemu. Naproti tomu však může docházet k úbytku aditiv (změkčovadla, přísady proti stárnutí), čímž se materiál smršťuje.

Snášlivost olejů s elastomery je určena obsahem aromat. Např. naftenické oleje způsobují nabobtnávání, zato parafinické jsou pro kontakt s elastomery vhodnější. [6]

3 ZPŮSOBY MĚŘENÍ

3.1 MĚŘENÍ HUSTOTY

K měření hustoty se v praxi využívá rozličných přístrojů, jež volíme dle požadavků na rychlosti a přesnosti měření. Společně s hustotou měříme v každém okamžiku i teplotu vzorku, jelikož je hustota teplotně závislou veličinou.

Hustotu můžeme měřit hned několika způsoby, které vycházejí ze základních fyzikálních předpokladů. Mezi nejznámější metody měření hustoty patří:

- a) pyknometrická metoda
- b) metoda ponorného tělíska
- c) použití provozních snímačů

[11], [12]

3.1.1 PYKNOMETRICKÁ METODA

Metoda funguje na principu porovnání kapaliny o neznámé hustotě s referenční kapalinou o hustotě známé a stejném objemu jako zkoumaný vzorek. Ačkoli by se na první pohled nemuselo zdát, tato metoda je při dodržení správného a přesného pracovního postupu velmi přesnou metodou měření hustoty. Vztah pro výpočet hustoty neznámého vzorku vychází z předpokladu rovnosti poměrů objemů a hustot kapalin:

$$\frac{\rho_3 - \rho_v}{\rho_2 - \rho_v} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \quad (3.1)$$

m_1	hmotnost prázdného pyknometru [kg]
m_2	hmotnost pyknometru naplněného referenční kapalinou [kg]
m_3	hmotnost pyknometru s měřenou kapalinou [kg]
ρ_v	hustota vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_2	hustota referenční kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_3	hustota měřené kapaliny [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]

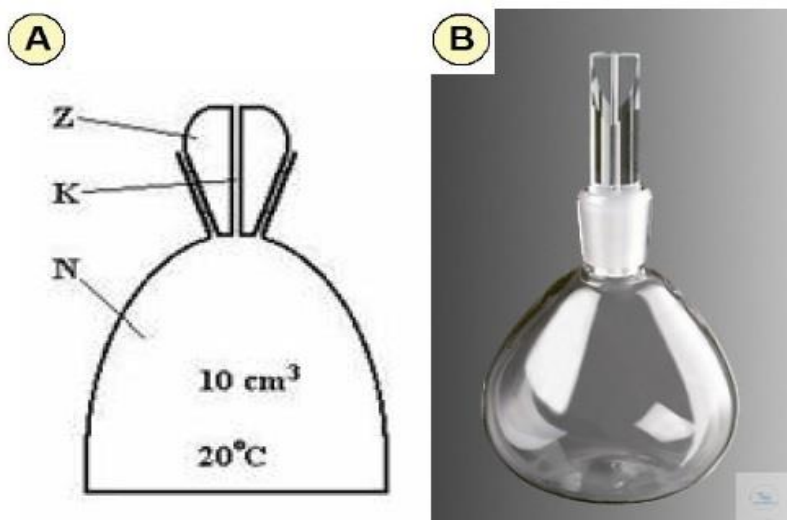
Pyknometry jsou malé skleněné baňky „hruškovitého“ tvaru uzavřené zábrusovou zátkou. Zátka je opatřena ryskou vymezující přesný objem naplněné kapaliny a tenkou kapilárou, jíž přebytečný objem kapaliny vyteče ven. Zátky jsou přesně dimenzovány na své pyknometry, v případě poškození zátky či její záměně je pyknometr znehodnocen a nedá se dále používat.

Pro přesné odměřování pyknometrem bychom se měli držet několika zásad:

- pyknometr musí být dokonale čistý a před plněním kapaliny suchý
- pyknometr musí být naplněn pouze objemem kapaliny daným ryskou

- vzorek temperujeme na předem určenou teplotu

Postup měření je následující. Nejprve změříme hmotnost prázdného, vysušeného pyknometru na analytických vahách. Dále do něj nalijeme referenční kapalinu až těsně pod hrdlo (dáváme si pozor na tvorbu vzduchových bublin, kterou se snažíme eliminovat). Pyknometr uzavřeme zátkou, počkáme, než vyteče přebytečný objem kapaliny, hladinu nastavíme po rysku a vložíme na 30 minut do temperovací lázně o teplotě 20°C. Po vyjmutí z lázně se pyknometr osuší a zváží. Pokračujeme vyprázdněním pyknometru, důkladným vymytím (ethanolem a poté etherem), opětovným naplněním, tentokrát však kapalinou o neznámé hustotě, až po rysku. Opět provedeme temperování, poté baňku osušíme a zvážíme. Výslednou hustotu získáme ze Vztahu 3.1. [11], [12]



Obrázek 3.1 - Pyknometr [11]

A – Schéma pyknometru (Z – zátka, K – kapilára, N – nádoba), B – Ukázka pyknometru

3.1.2 METODA PONORNÉHO TĚLÍSKA

Měření hustoty metodou ponorného tělíška je v praxi velmi rozšířenou metodou. Přestože patří mezi méně přesné metody, variant typu přístrojů, jež využívají tuto metodu, je hned celá řada. Metoda využívá základního fyzikálního principu, konkrétně **Archimedova zákona**, který nám říká, že těleso (hustoměr) ponořené do kapaliny (vzorku kapaliny) je nadlehčováno silou rovnající se tíze kapaliny stejného objemu jako je ponořená část tělesa. Čím je hustota vzorku nižší, tím hlouběji se hustoměr ponoří.

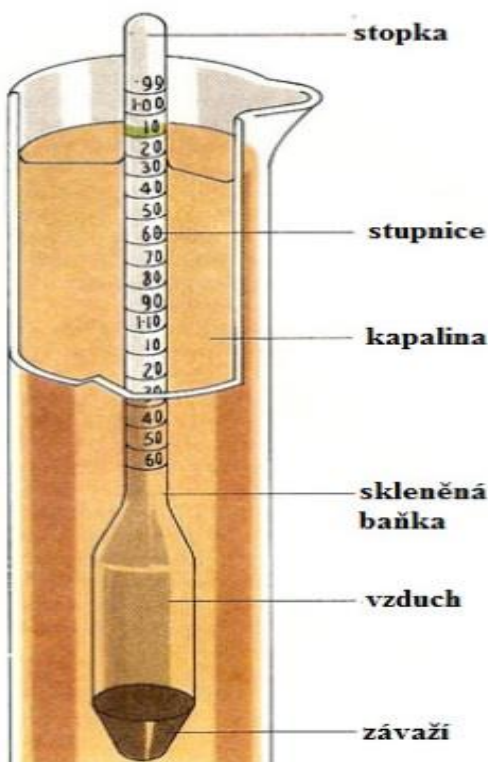
Hustoměr

Hustoměr je těleso ve tvaru tenké skleněné baňky, jež je přizpůsobeno plovat v kapalině ve svislé poloze. Ve vnitřní části baňky hustoměru je stupnice pro odečítání hustoty, někdy je v ní

obsažen i teploměr. Aby bylo měření přesnější, prodávají se hustoměry po celých sadách, kde je každý přístroj určen pro měření pouze v malém rozsahu hustot.

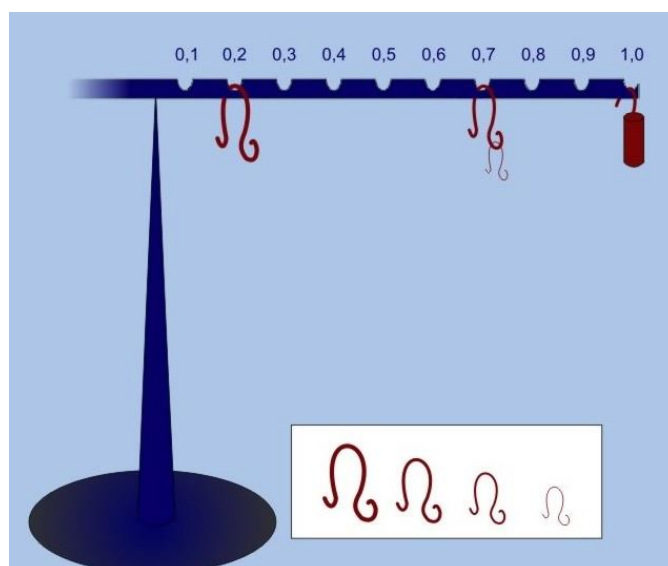
Pro měření hustoměrem postupujeme následovně:

- vytemperujeme zkoumaný vzorek na předem definovanou teplotu a nalijeme do odměrného válce
- opatrně ponoříme hustoměr do kapaliny
- zkontrolujeme, zda máme správně zvolen rozsah měření
- zkontrolujeme, zda se hustoměr nedotýká dna ani boků nádoby
- vyčkáme, než se uklidní hladina měřeného vzorku
- odečteme hodnotu hustoty ze stupnice na přístroji



- sestavíme váhy, zavěšíme tělísko na delší rameno a vyčkáme, než se váhy ustálí do vodorovné polohy
- vzorek vytemperujeme na předem definovanou teplotu a ponoříme do něj tělísko, které zatížíme jezdcem na rameni vah
- přidáváme další jezdce na rameno vah, dokud se přístroj neustálí v rovnovážné poloze (váhy jsou nastaveny na $1,0000 \text{ g/cm}^3$)
- postup zopakujeme i pro měřený vzorek
- pokud tělísko klesne na dno nádoby, hustota je nižší než $1,0000 \text{ g/cm}^3$ a naopak
- přístroj vyvážíme
- hodnota hustoty a desetinné místo je násobkem udané hodnoty jezdce a pořadí zářezu, na kterém je zavěšen (pokud nějaký z jezdců nepoužijeme, je na daném desetinném místě hodnota 0)

Na Obr. 3.3 je zobrazena poloha jezdců pro hustotu o hodnotě $1,2707 \text{ g/cm}^3$.



Obrázek 3.3 - Ukázka měření Mohrovými vahami [12]

[7], [11], [12], [13]

3.2 MĚŘENÍ VISKOZITY

Pro měření viskozity používáme speciálních přístrojů nazývaných **viskozimetry**. V praxi se využívá hned několika metod měření:

- Absolutní – měříme všechny ostatní veličiny, z kterých pomocí vztahů získáme viskozitu
- Relativní – výsledky měření srovnáváme s kapalinou, jejíž dynamickou viskozitu známe

Obecně dělíme kapaliny na newtonské a nenewtonské. Newtonské kapaliny můžeme definovat jako kapaliny, u kterých se viskozita řídí dle Newtonova zákona. Určení jejich viskozity

je poměrně jednoduché, je to látkový parametr závislý na teplotě a tlaku a pro její měření můžeme použít všech dostupných typů viskozimetrů. U nenewtonských kapalin tyto předpoklady neplatí, a proto jsme nuceni změřit celou tokovou křivku tzv. **reogram**.

Nejčastěji se využívá těchto typů viskozimetrů:

- a) kapilární (průtokové)
- b) výtokové
- c) tělískové
- d) rotační

[5], [7], [9]

3.2.1 KAPILÁRNÍ VISKOZIMETRY

Měření viskozity pomocí kapilárních (průtokových) viskozimetrů je odvozeno z **Hagen-Poiseuilova vztahu** pro laminární výtok kapalin z kolmé trubice kruhového průřezu:

$$\eta = \frac{\pi \cdot p_z \cdot R^4}{8 \cdot Q \cdot L} \quad (3.2)$$

η	dynamická viskozita [Pa · s]
p_z	tlakový spád v kapiláře [Pa]
R	poloměr trubice [m]
L	délka trubice [m]
Q	objemový průtok kapaliny [m ³ · s ⁻¹]

Často se využívá kapilárních viskozimetrů s konstantním tlakovým spádem **p_z** (pomocí tlakového inertního plynu nad hladinou kapaliny v trubici) či konstantním objemovým průtokem **Q** (konstrukčně složitější, použití čerpadla). V praxi se však můžeme setkat i s relativní metodou měření, která funguje na základě porovnání kinematické viskozity s již známou referenční kapalinou:

$$\nu = \frac{\tau}{\tau_0} \cdot \nu_0 \quad (3.3)$$

ν	kinematická viskozita zkoumané kapaliny [m ² · s ⁻¹]
ν_0	kinematická viskozita referenční kapaliny [m ² · s ⁻¹]
τ	doba výtoku zkoumané kapaliny [s]
τ_0	doba výtoku referenční kapaliny [s]

Viskozimetr Ostwaldův

Měření tímto viskozimetrem patří mezi ty jednodušší. Levou trubicí nalijeme potřebný objem měřené kapaliny do viskozimetru. Pravou trubicí začneme kapalinu nasávat, dokud hladina nedosáhne alespoň rysky Z_1 . Následně měříme čas, při kterém kapalina vlastní vahou proteče trubicí K mezi ryskami Z_1 a Z_2 . Viskozitu získáme užitím Vztahu 3.4.

Viskozimetr Ubbelohdův

Měření viskozity pomocí toho viskozimetru probíhá následovně. Levou trubicí vléváme tekutinu do viskozimetru, přičemž se nám plní nádoba D. S plněním přestáváme, jakmile hladina tekutiny dosáhne úrovně mezi ryskami c – d. Následuje vytemperování vzorku kapaliny na požadovanou teplotu a uzavření prostřední trubice viskozimetru. Měřenou kapalinu začneme nasávat do nádoby A, dokud není alespoň z poloviny naplněna. Poté uvolníme všechny trubice a podobně jako u předchozího příkladu měříme čas průchodu hladiny kapaliny mezi ryskami Z_1 a Z_2 . Viskozitu jsme pak schopni získat použitím upravené verze Bernoulliho rovnice:

$$\nu = A \cdot \tau - \frac{B}{\tau} \quad (3.4)$$

A kalibrační konstanta [–]

B korekce na kinetickou energii [–]

Viskozimetr Vogel- Ossag

Tento typ viskozimetru se skládá z nádržky se zkoumanou kapalinou (1), kapiláry K s připojenými nádobami kulového či válcového tvaru (2), odsávacího zařízení nebo tlakového média (3) a teploměru (4). Viskozitu změříme tak, že pomocí odsávacího zařízení (pumpičky) vytlačíme hladinu kapaliny až nad rysku Z_1 . Následovně opět měříme dobu, za kterou kapalina proteče mezi ryskami Z_1 a Z_2 . Kinematickou viskozitu můžeme vypočítat ze Vztahů 3.3, 3.4 nebo také z rovnice:

$$\nu = k \cdot \tau \quad (3.5)$$

k konstanta určená cejchováním (nebo výrobcem) [–]

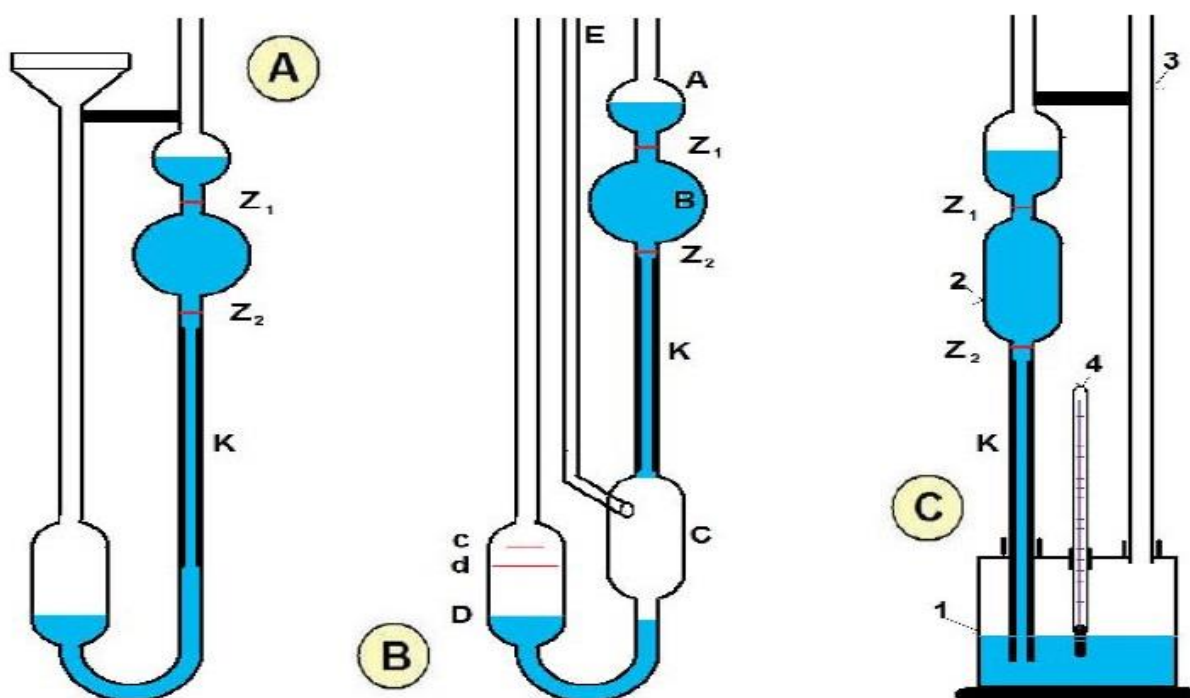
V případě, že bychom chtěli vyřešit přímo dynamickou viskozitu, připojíme nátrubek pozice (3) na zdroj tlaku odpovídající účinku kapalinového sloupce (o výšce $H = 60 \pm 2$ mm vody) a měříme dobu τ zvedání hladiny kapaliny mezi ryskami Z_2 a Z_1 . Dynamickou viskozitu získáme přímo ze vztahu:

$$\eta = c \cdot \tau \quad (3.6)$$

c konstanta určená cejchováním (nebo výrobcem) [–]

Kapilární viskozimetr s pístem

Zkoumané médium je nasáváno pístem skrz kalibrovanou ocelovou kapiláru. Zaznamenávána a hodnocena je tlaková difference, rychlost pohybu pístu nebo objemový průtok a teplota média. Pomocí tlakové difference na definované délce a průměru kapiláry jsme schopni vypočítat viskozitu (např. dle Vztahu 3.1). Stejně tak můžeme měřit v případě, když budeme médium pístem vytlačet, z rozdílu tlaků, parametrů kapiláry a použitím předchozího vztahu získáme dynamickou viskozitu.



Obrázek 3.4 - Schémata kapilárních viskozimetrů [9]

A – Ostwaldův viskozimetr, B - Ubbelohdův viskozimetr, C – Vogel-Ossagův viskozimetr

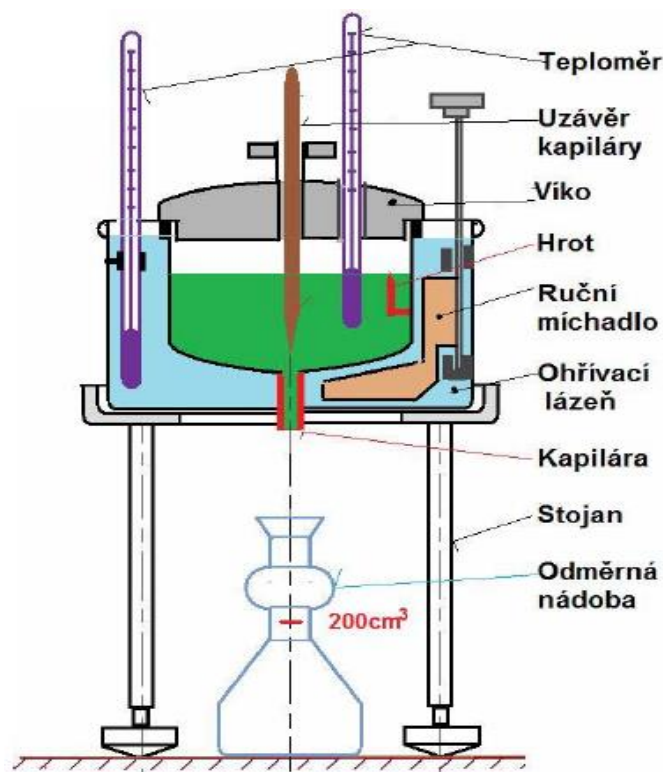
3.2.2 VÝTOKOVÉ VISKOZIMETRY

Měření pomocí výtokových viskozimetrů vychází z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici o kruhovém průřezu stejně jako u kapilárních viskozimetrů. Rozdíl oproti předchozímu typu však tvoří podstatně menší délka kapiláry oproti jejímu průřezu, čímž se velká část potenciální i tlakové energie spotřebuje na krytí ztrát vtokem i výtokem, na kinetickou energii, a taktéž i na vytvoření parabolického rychlostního profilu v trubici.

Viskozita se u takových viskozimetrů zjišťuje jako poměrná veličina k viskozitě referenční kapaliny při určité teplotě, jelikož velikost kinetické energie nejsme schopni určit přesně.

Viskozimetr Englerův

Englerův viskozimetr se skládá z nádoby válcového tvaru (průměru 106 mm), nádoba je uvnitř pozlacena a ve spodní části opatřena výtokovou kapilárou (délky 20 mm a vnitřního průměru 2,9 mm, jenž se mírně zužuje až na průměr 2,8 mm). Je uzavřena dvojitém víkem, kterým prochází uzávěr kapiláry (plastová či dřevěná tyčinka ukončená hrotem nebo kuličkou). Nádoba na zkoumání viskozity je naplněna testovaným médiem, tak aby její hladina sahala až ke třem hrotům přichyceným ke stěně. Tato nádoba je ponořena ve vodní lázni, jejíž teplota se dá pomocí regulovat (zahřát na požadovanou teplotu).



Obrázek 3.5 - Schéma Englerova viskozimetru [9]



Obrázek 3.6 - Reálný Englerův viskozimetr [10]

Viskozita v Englerových stupních [E°] se určuje jako poměr doby výtoku měřeného média o objemu 200 cm³ a doby výtoku destilované vody o stejném objemu a teplotě 20°C. Doba výtoku destilované vody bývá zpravidla 50÷52 s.

$$E = \frac{\tau}{\tau_v} \quad (3.7)$$

E	viskozita dle Englera [°E]
τ	doba výtoku zkoumané kapaliny [s]
τ _v	doba výtoku destilované vody [s]

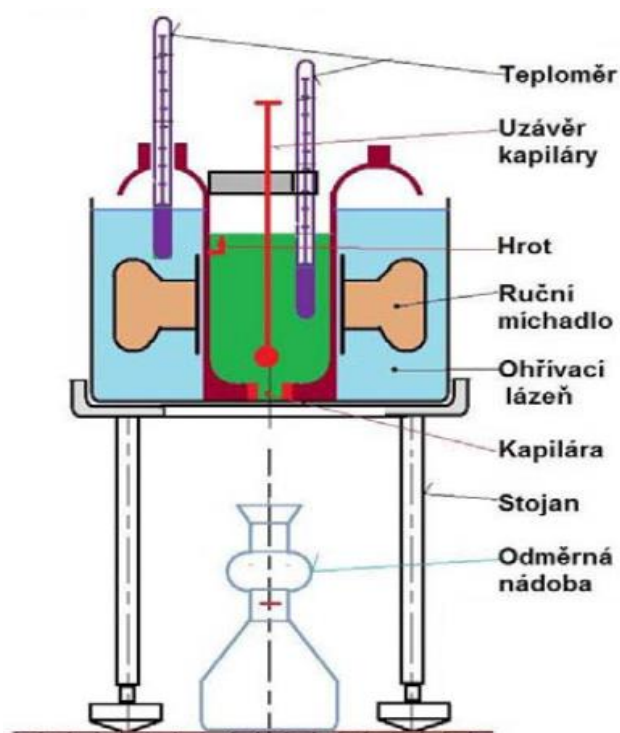
Pro přepočet viskozity z jednotek Englerových [°E] na kinematickou viskozitu lze použít tohoto empirického vztahu:

$$\nu = \left[7,31 \cdot E - \frac{6,31}{E} \right] \cdot 10^{-6} \quad (3.8)$$

Englerův viskozimetr jako standart mezi výtokovými viskozimetry patří mezi přístroje s vysokou přesností i reprodukovatelností. Podmínkou přesného měření je temperování měřeného vzorku, jež se nesmí uspěchat (15 až 25 minut), teploměr musí ukazovat stejnou teplotu kapaliny v měřené lázni i temperující vodě. Temperující kapalinu promícháváme mechanicky pomocí zabudované lopatky, naopak testované médium nemícháme.

Viskozimetr Redwoodův

Redwoodův viskozimetr sestává z několika primárních částí. První je válcová nádoba, do které vléváme testovanou kapalinu, s achátovou tryskou s možností uzavírání mechanickou kličkou. Je také opatřena malými hroty po svém obvodu, pomocí nichž si můžeme lehce ověřit, zda máme konstantní objem kapaliny ve viskozimetru. Nádoba je umístěna ve větší nádobě s vodní lázní, která zajišťuje konstantní ohřev a temperování vzorku v průběhu testování pomocí elektrické spirály. Jelikož se obě kapaliny míchají ručně, je nutné věnovat temperování dostatečně dlouhý čas. Při teplotách vyšších nad 100°C se při temperování využívá válcovacího oleje.



Obrázek 3.7 - Schéma Redwoovova viskozimetru [9]

Kinematickou viskozitu získáme změřením času, za který proteče viskozimetrem 50 cm^3 testované kapaliny a aplikováním Vztahu 3.4.

Hodnoty konstant A a B vystupujících ve Vztahu 3.4 jsou:

$$A = 0,264; \quad B = 190 \quad \text{pro } \tau = 40 \div 85 \text{ s}$$

$$A = 0,247; \quad B = 65 \quad \text{pro } \tau = 85 \div 2000 \text{ s}$$

Viskozimetr Sayboltův

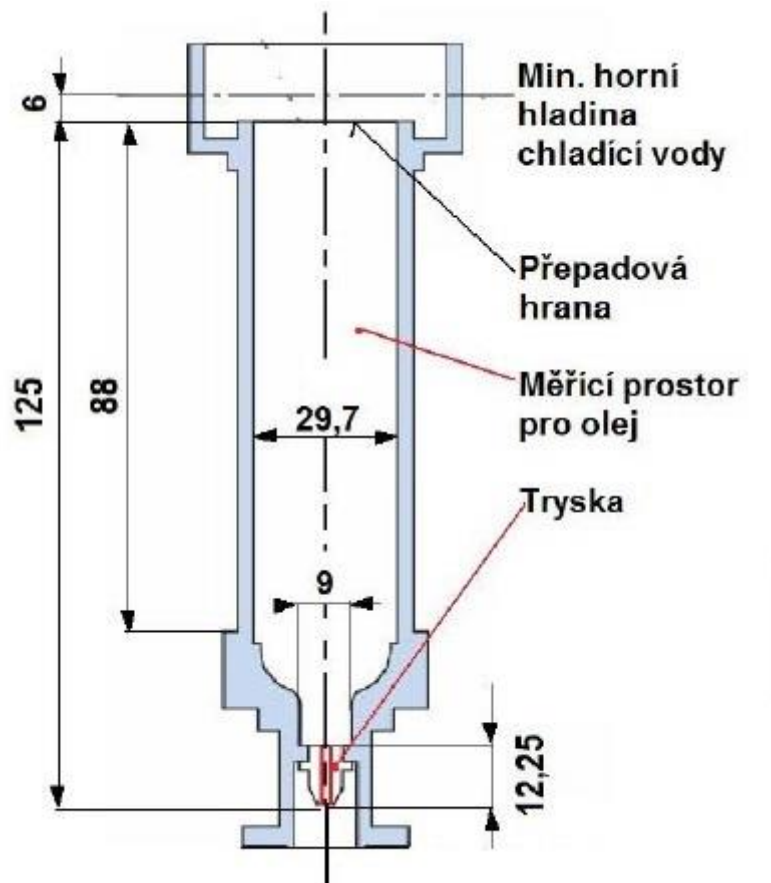
Při měření viskozity pomocí Sayboltova viskozimetru necháváme protéct 60 cm^3 testované kapaliny tryskou viskozimetru, přičemž měříme dobu výtoku. Naměřený čas je roven číslu SUS – Saybolt Universal Seconds (taktéž známé pod názvem SSU – Saybolt Second Universal). Následně použijeme jednoduchého vztahu na přepočet jednotek SSU na jednotky centi Stokes:

$$v_{cSt} = 0,226 \cdot v_{SSU} - \frac{195}{v_{SSU}} \quad \text{pro } v_{SSU} < 100 \quad (3.9)$$

$$v_{cSt} = 0,220 \cdot v_{SSU} - \frac{135}{v_{SSU}} \quad \text{pro } v_{SSU} > 100 \quad (3.10)$$

Pro přepočet mezi jednotkou cSt a SSU přibližně platí:

- pro kapaliny $\nu > 50$ cSt při teplotě $t = 37,8^\circ\text{C}$ jeden SSU = $0,2158$ cSt = $0,2158\text{ mm}^2/\text{s}$
- pro kapaliny $\nu > 500$ cSt při teplotě $t = 50^\circ\text{C}$ jeden SSF = $2,120$ cSt = $2,120\text{ mm}^2/\text{s}$.



Obrázek 3.8 - Schéma Sayboltova viskozimetru [9]

Měření Sayboltovým viskozimetrem se hojně užívá především v USA a provádí se podle metody ASTM D 88. [9]

3.2.3 TĚLÍSKOVÉ VISKOZIMETRY

Měření tělískovými viskozimetry je principiálně založeno na rychlosti pohybu tělesa ve zkoumaném médiu. Zkušebním tělesem bývá zpravidla hladká kulička. Pro výpočet dynamické viskozity tímto typem viskozimetrů platí upravená forma Stokesova vztahu pro konstantní pádovou rychlost kuličky v kapalině:

$$\eta = \frac{d^2 \cdot (\rho_k - \rho_m)}{18 \cdot L} \cdot \tau \quad (3.11)$$

d	průměr kuličky [m]
ρ_k	hustota kuličky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
ρ_m	hustota zkoumaného média [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
L	dráha pádu kuličky [m]
τ	doba průchodu kuličky zkušební dráhou [s]

Zajímá-li nás rychlost kuličky, jsme ji schopni vypočítat, jako poměr dráhy zkušebního tělesa k době, po kterou těleso touto drahou prochází:

$$w = \frac{L}{\tau} \quad (3.12)$$

w rychlost zkušebního tělesa v médiu [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

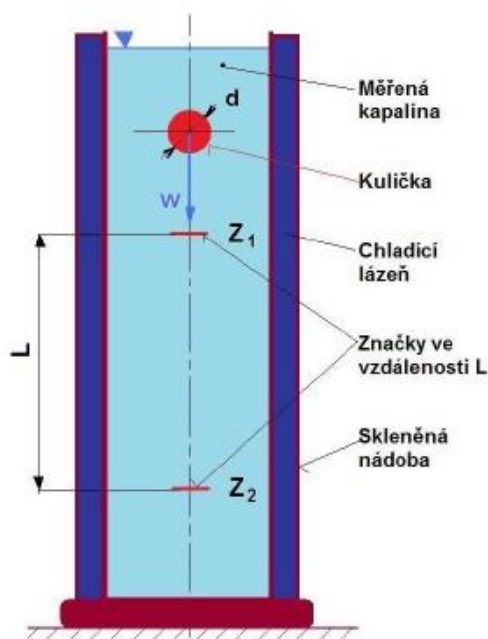
Jelikož výpočet dle Stokesova vztahu je ideálním případem pohybu kuličky v kapalině, je potřeba zavést určitou korekci pro reálné měření. Jako korekce nám slouží tzv. **opravný koeficient** (také bývá označován jako konstanta viskozimetru), který zohledňuje vliv průměru kuličky, průměru zkušební nádoby i délku dráhy pádu. Koeficient určujeme při kalibraci přístroje měřením médií o známé viskozitě.

$$\eta = k \cdot (\rho_k - \rho_m) \cdot \tau \quad (3.13)$$

k opravný koeficient [–]

Viskozimetr Stokesův

Stokesův viskozimetr je konstrukčně nejjednodušším typem tělískového viskozimetru. V podstatě je to pouze skleněný válec naplněný zkoumaným médiem, jsou na něm vyznačeny dvě rysky Z_1 a Z_2 ležící od sebe ve vzdálenosti L. Princip měření spočívá v měření doby τ , za kterou kulička překoná vzdálenost L mezi dvěma ryskami. Dynamickou viskozitu kapaliny pak získáme dle Vztahu 3.11. Pokud bychom chtěli měřit i v závislosti na teplotě, je možné celé zařízení temperovat.



Obrázek 3.9 - Schéma Stokesova viskozimetru [9]

Viskozimetr bublinkový

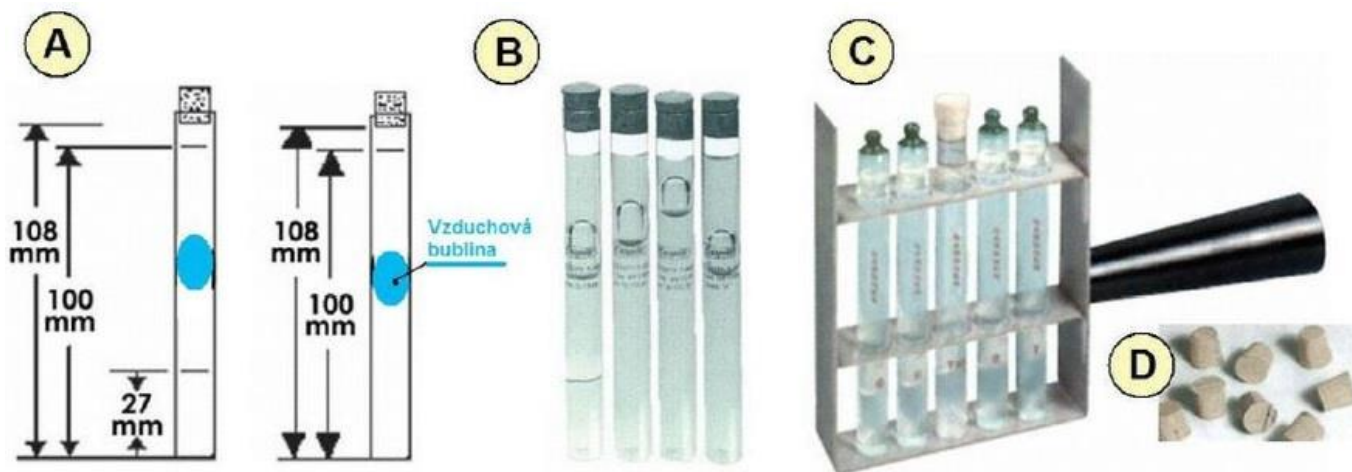
U tohoto typu viskozimetru je tělísko (v předchozím případě kulička) nahrazeno bublinou. Rychlost pohybu bubliny ve zkoumaném médiu je měřítkem viskozity. Viskozimetr se skládá ze skleněné trubice (o průměru 10,65 mm nebo 10,75 mm), měřené kapaliny a zátky. Na trubici jsou vyznačeny tři rysky, jedna ve výšce 27 mm, druhá ve výšce 100 mm ode dna, jež nám značí, po jakou výšku máme trubicu naplnit kapalinou a třetí ve výšce 108 mm, dle které má být zarovnána spodní plocha korkové zátky viz Obr. 3.10A. Prostor mezi hladinou kapaliny a zátkou je vyplněn vzduchem o přesně definovaném objemu. Měřicí zařízení lze také temperovat, v tomto případě můžeme např. ponořit trubicu do vody o známé teplotě.

Měření viskozity bublinkovým viskozimetrem se provádí dvojím způsobem:

- a) **relativní** – viskozitu určujeme relativně porovnáním s viskozitou již známé kapaliny. Do stojanu viz Obr. 3.10C vložíme několik trubiček s kapalinou o známé viskozitě a jednu trubičku s kapalinou, jejíž viskozitu chceme určit. Stojan na krátkou chvíli převrátíme o 180° a poté ho vrátíme do původní polohy. Porovnáním rychlostí pohybu bublin v trubičkách určíme, jakou viskozitu má naše médium (měřené médium bude mít takovou viskozitu, jako kapalina o známé viskozitě, jejíž bublina překonala vzdálenost 100 mm v trubici za stejný čas jako měřené médium). Pokud se vzduchová bublina měřeného vzorku pohybuje rychleji než bublina známé kapaliny, platí, že měřený vzorek má viskozitu menší.
- b) **absolutní** – v tomto případě určíme viskozitu měřením času, za který vzduchová bublina projde mezi ryskami ve výšce 27 mm a 100 mm ode dna trubice. Obecně platí, že 1 sekunda měření odpovídá viskozitě o velikosti 1 Stokes.

Měření pomocí bublinkových viskozimetrů může být zatíženo chybami měření:

- a) vliv teploty – změna o 1°C , relativní chyba až 10%
- b) vliv sklonu trubice – změna o 5° , relativní chyba 10%
- c) vliv výšky hladiny – změna o 0,1 mm, relativní chyba 2%

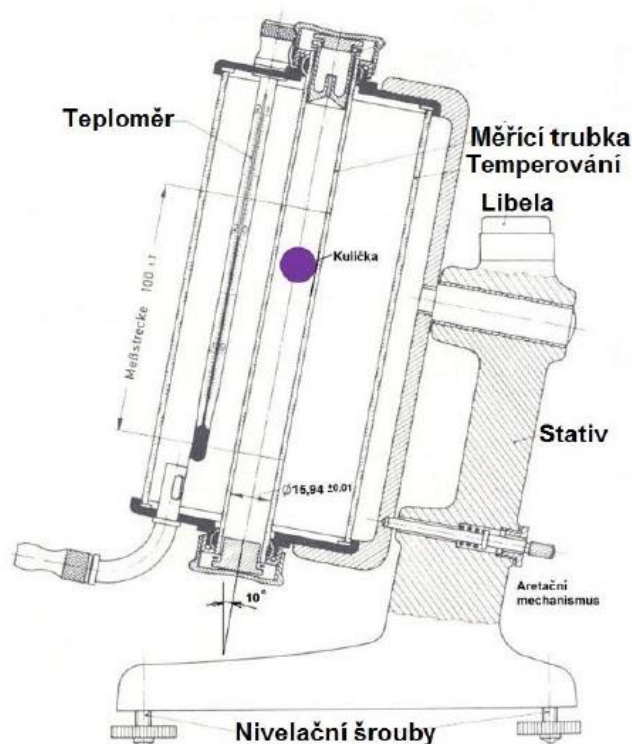


Obrázek 3.10- Bublinkový viskozimetr [10]

A – rozměry trubičky, B – ukázka trubiček, C – stojan bublinkových viskozimetrů, D – korkové zátky

Viskozimetr Höpplerův

Jedná se o zařízení, které se vyznačuje jednoduchou konstrukcí, vysokou přesností měření a možností opakování měření. Höpplerův viskozimetr se skládá ze skleněné trubice skloněné o 10° od vertikální osy, vnější nádoby, pevného stojanu, teploměru a kuličky o definovaném průměru. Kuličky mohou být vyrobeny ze skla i kovu, různého průměru, což nám umožňuje měření viskozity v širokém intervalu hodnot.



Obrázek 3.11 - Schéma Höpplerova viskozimetru [9]



Obrázek 3.12 - Ukázka reální Höpplerova viskozimetru [10]

Princip měření spočívá v naplnění vnitřní kalibrované trubice zkoumaným médiem, následovněm vhození kuličky do média a měření doby, za kterou se kulička přemístí mezi dvěma ryskami ve vzdálenosti 100 mm od sebe. Dynamickou viskozitu následovně vypočítáme ze Vztahu 3.13.

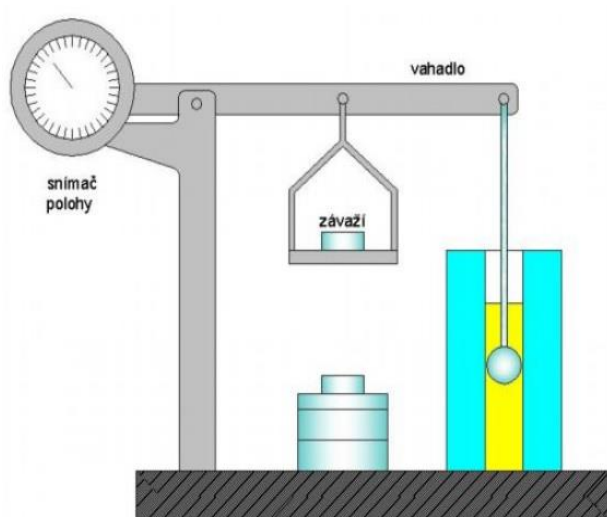
Nepřesnost tohoto přístroje se pohybuje v rozmezí $\pm 2\%$ a můžeme jej používat pro kapaliny i plyny v rozmezí tlaků 0,6 – 80000 mPa · s. Do vnější nádoby viskozimetru lze také přivádět chladicí lázeň z termostu a tak temperovat vzorek v širokém rozsahu teplot (-60°C až 150°C).

Rheo-viskozimetr s tlačnou kuličkou

Na stejném principu jako předchozí typ viskozimetru pracuje Rheo-viskozimetr s tlačnou kuličkou, někdy dokonce přezdívaný jako Höpplerův Rheo-viskozimetr. Viskozimetr sestává z kalibrované trubice se zkoumaným médiem, do média je protlačována kulička, jež je pevně spojena s vahadlem pomocí tenké tyčinky. Na vahadlo přikládáme závaží, čímž ovlivňujeme protlačování kuličky do tekutiny. Vhodným indikátorem (snímačem polohy) pak současně měříme dráhu i čas potřebný k přesunu kuličky po zvolené dráze. Dynamickou viskozitu pak získáme z následujícího vztahu:

$$\eta = k_1 \cdot P \cdot \tau \quad (3.14)$$

k_1	koeficient viskozimetru [–]
P	velikost závaží [kg]
τ	doba poklesu kuličky o stanovenou dráhu [s]



Obrázek 3.13 - Schéma Rheo-viskozimetru [5]

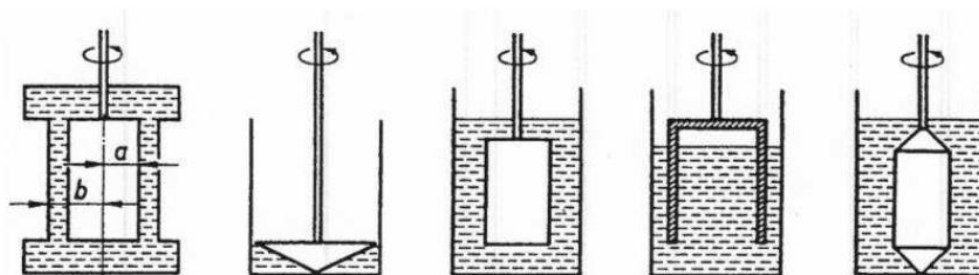


Obrázek 3.14 - Reálný Rheo-viskozimetru [9]

Výhodou Rheo-viskozimetru je možnost měření v širokém rozsahu viskozit (0,004 až 4000 Pa · s). Také bychom neměli opomenout možnost měření nenewtonských kapalin, u nichž změnou závaží na vahadle dosahujeme různého gradientu rychlosti. [5], [9]

3.2.4 ROTAČNÍ VISKOZIMETRY

V případě posouzení viskozity mezi dvěma vzájemně se pohybujícími plochami nám může skvěle vyhovět rotační viskozimetr. Soustavu převedeme na dva sousedé válce, přičemž se jeden pohybuje a druhý zůstává stacionární.



Obrázek 2.15- Schématické znázornění rotačních viskozimetrů [11]

Měřením získáváme přímo údaje o veličinách jako je úhlová rychlost, počet otáček za určitý čas a dále bližší informace o odporu měřeného média proti smykovému namáhání v důsledku vzniku gradientu rychlosti. Odpor se projevuje jako krouticí moment, který působí proti rotačnímu pohybu jednoho z válců viskozimetru.

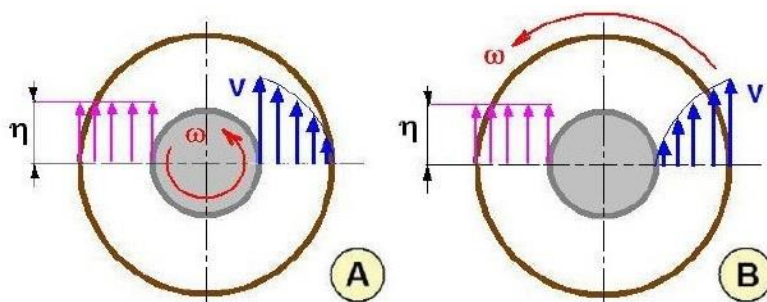
Rotačními viskozimetry je možno měřit viskozitu newtonských i nenewtonských kapalin, u nenewtonských kapalin se zjišťují tzv. **tokové křivky** (reogramy), měřicí přístroje se tudíž jmenují **reometry**. Rotační viskozimetry můžeme nejčastěji potkat v provedeních: 2 souosé válce, kužel-deska nebo 2 rotující desky.

Rotační viskozimetr – souosé válce

Při použití dvou souosých válců se nám naskýtají přesně dvě možnosti uspořádání:

- Couettův systém – vnitřní válec rotuje, vnější zůstává stacionární
- Searlův systém – vnitřní válec je stacionární, vnější rotuje

Z praxe je spíše doporučován systém podle Couetta, ale v podstatě by nemělo být mezi systémy velkých rozdílů, jelikož při výpočtech uvažujeme relativní rychlost obou válců.



Obrázek 3.16 - Rychlostí profil mezi rotujícími válci [9]

A – Couettův systém, B – Searlův systém

Předpokladem získání viskozity jsou dvě rovnice. První z nich je vztah pro výpočet krouticího momentu na obecném poloměru od osy rotace:

$$M = 2\pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau \quad (3.15)$$

M	krouticí moment [Nm]
r	obecný poloměr od osy rotace [m]
h	hloubka ponoření vnitřního válce do kapaliny [m]
τ	smykové (tečné) napětí [Pa]

Druhý vztah je smykové napětí, které určíme Newtonským vztahem:

$$\tau = \eta \cdot \frac{r \cdot d\omega}{dr} \quad (3.16)$$

$d\omega$ změna úhlové rychlosti [Nm]

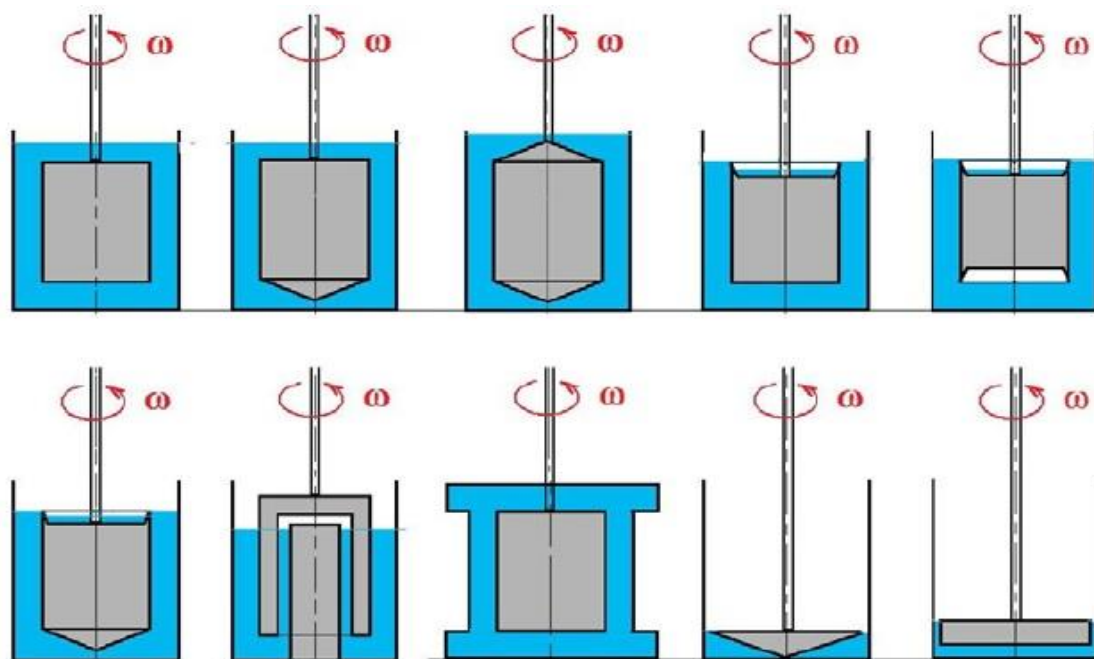
Pro spojení a úpravě obou rovnic získáme dynamickou viskozitu:

$$\eta = \frac{M}{4\pi \cdot h \cdot \omega} \cdot \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] \quad (3.17)$$

R_1 poloměr vnitřního válce [m]

R_2 poloměr vnějšího válce [m]

V předešlých vztazích pracujeme s předpokladem, že třecí síly vznikají pouze po obvodu válcových ploch stacionárního a rotujícího válce. V praxi však víme, že nám výpočty může značně ovlivňovat např. tření válců o dno či víko. Tyto vlivy nazýváme tzv. **koncové efekty** a naším cílem je, co nejvíce jejich účinky eliminovat, aby naše naměřená velikost krouticího momentu byla co nejméně zatížena chybou. Pro snížení těchto koncových vlivů bylo navrženo několik empirických úprav válců.



Obrázek 3.17 - Empirické úpravy rotačních viskozimetrů [7]

I změna teploty může mít neblahý vliv na přesnost měření viskozity. Se zvyšující se teplotou kapaliny, která roste se zvyšováním otáček viskozimetru, klesá krouticí moment. Tento vliv jsme schopni eliminovat pomocí chlazení, při vyšších otáčkách však nebývá chlazení

dostačující (součinitel přestupu tepla je pro laminární proudění malý). Proto se snažíme eliminovat vliv ohřevu vzorku i ve svých výpočtech.

Rotační viskozimetr – kužel-deska

Viskozimetr o tomto uspořádání je vhodný převážně pro měření kapalin o vyšší viskozitě. Zkoumaná kapalina je umístěna mezi kužel a desku, kužel je následně uveden do rotačního pohybu (2. možnost – deska rotuje, kužel jako stator), přičemž je kapalina vystavena konstantní rychlosti smykové deformace. Jelikož je štěrbina mezi dvěma tělesy poměrně malá, je zapotřebí jen malého množství kapaliny. To můžeme pokládat také za výhodu, pokud chceme měřit viskozitu v závislosti na teplotě, malé množství kapaliny se bude lépe vyhřívat.

Vztah mezi smykovým napětím a krouticím momentem pro uspořádání kužel-deska:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi \cdot R^3} \quad (3.18)$$

R poloměr podstavy kužele [m]

Pro výpočet gradientu rychlosti platí:

$$D = \frac{\omega}{\alpha} \quad (3.19)$$

D gradient rychlosti [s^{-1}]

α úhel štěrbiny mezi kuželem a deskou [rad]

Analogickou úpravou a dosazením vztahů jako v případě 2 souosých válců do Newtonské rovnice získáme dynamickou viskozitu:

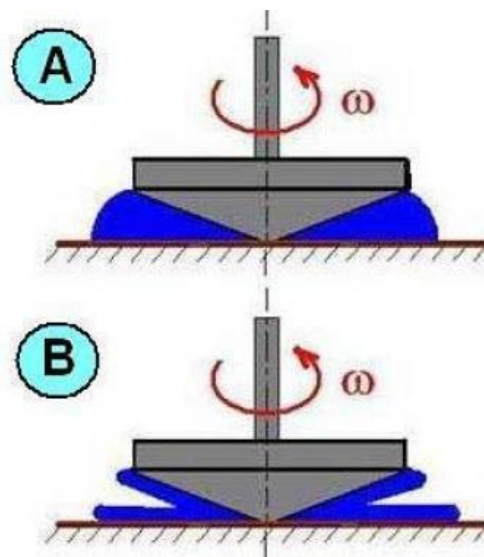
$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{3M \cdot \alpha}{2\pi \cdot R \cdot \omega^3} = K \cdot \frac{M}{\omega} \quad (3.20)$$

K konstanta viskozimetru [–]

Jednou z nevýhod tohoto typu viskozimetru je omezení z hlediska otáček. Při dosažení určitých otáček (kritických otáček) má kapalina sklony těsně kopírovat povrchy desky a kužele viz Obr. 3.19B a naměřená data neodpovídají skutečnosti. [5], [7], [9]



Obrázek 3.18 - Ukázka rotačního viskozimetru [9]



Obrázek 3.19 - Porovnání chování kapaliny v závislosti na otáčkách [9]

3.2.5 VIBRAČNÍ VISKOZIMETRY

Vibrační viskozimetry jsou založeny na principu tlumeného kmitání tělesa, jež je umístěno ve zkoumaném médiu. V praxi uvažujeme dva případy kmitání, v prvním pracujeme se vztahem pro nevynucené tlumené kmitání:

$$\ddot{y} + 2 \cdot b \cdot \dot{y} + \omega_0 \cdot y = 0 \quad (3.21)$$

a v druhém případě se jedná o vynucené tlumené kmity:

$$\ddot{y} + 2 \cdot b \cdot \dot{y} + \omega_0 \cdot y = \frac{F}{m} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (3.22)$$

b koeficient útlumu [$\text{Ns} \cdot \text{m}^{-1}$]

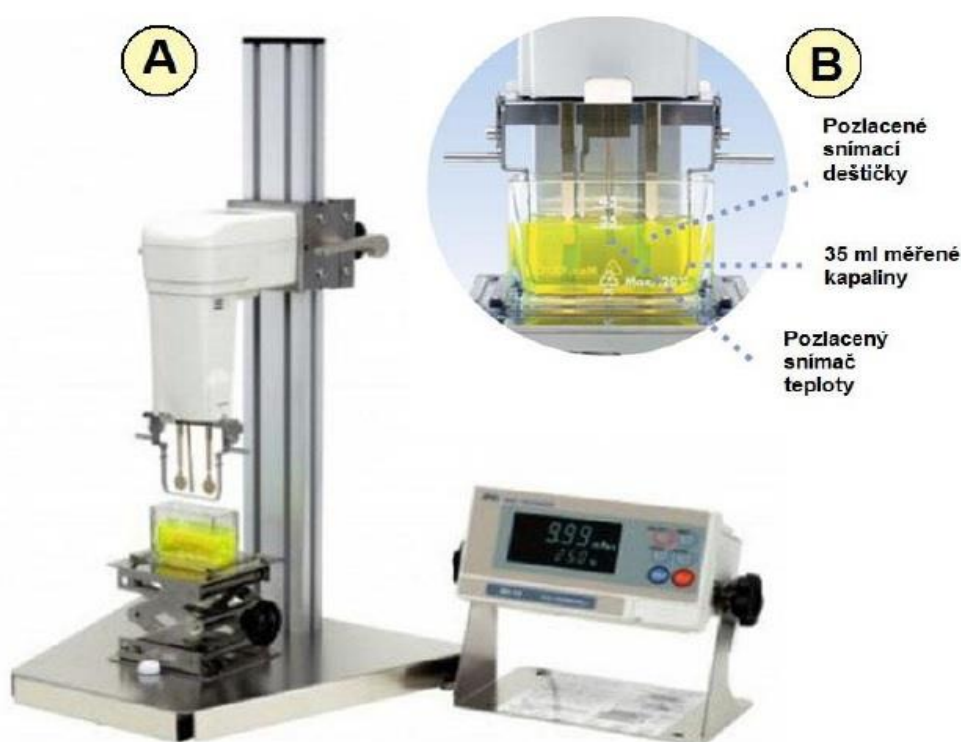
V případě laminárního proudění je koeficient útlumu **b** lineární funkcí kinematické viskozity $b \approx k \cdot \nu$, jsme tedy schopni odvodit i vztah pro výpočet koeficientu útlumu laminárního proudění kruhové trubice o definovaném průměru:

$$b = \frac{16\nu}{d^2} \quad (3.23)$$

ν kinematická viskozita [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]
 d průměr trubice [m]

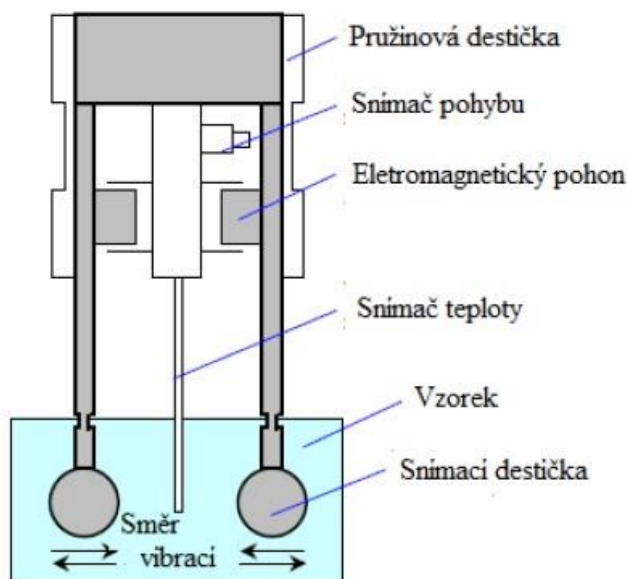
Při měření viskozity pomocí vibračních viskozimetrů využíváme tělísek rozmanitých geometrických tvarů (deska, válec, kruhový terč apod.) i velikostí, na nichž měříme útlum způsobený zkoumaným médiem. U vibračních viskozimetrů používáme obecně 3 přístupy měření:

- měříme příkon oscilace s konstantní amplitudou a konstantní frekvencí
- měříme dobu útlumu po vypnutí přístroje
- měříme rezonanční frekvenci



Obrázek 3.20 - Vibrační viskozimetr [9]

A – měřicí přístroj, B – měřicí nádoba



Obrázek 3.21 - Schéma detekčního systému vibračního viskozimetru [11]

Vibrační viskozimetr SV

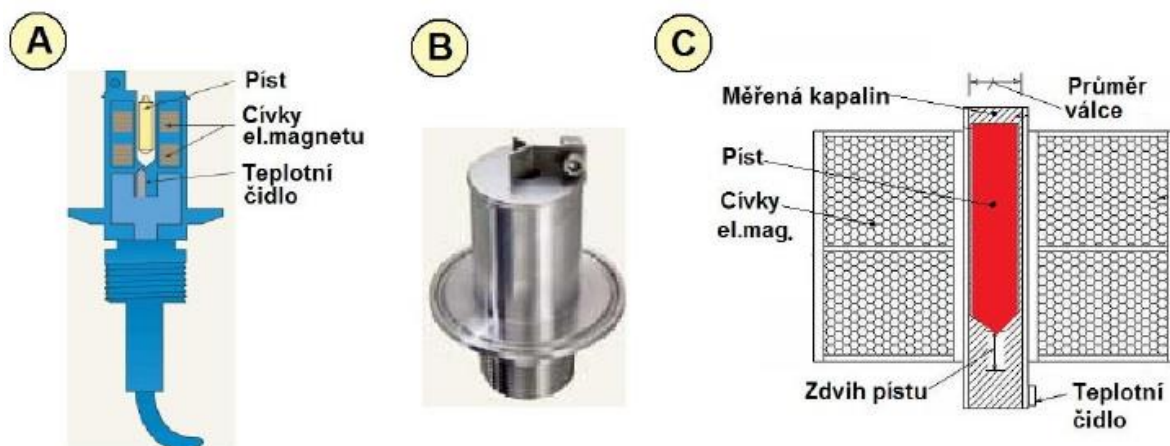
Princip toto typu vibračního viskozimetru spočívá ve snímání kmitů malých kruhových terčů, které jsou ponořeny do kapaliny a bržděny její třecí silou (amplituda kmitů se mění v závislosti na velikosti třecí síly). Viskozitu měříme nepřímě měřením sinusového budícího elektrického proudu potřebného pro konstantní rezonanci obou kruhových terčů při frekvenci 30 Hz a amplitudě nižší jak 1 mm. Současně nás zajímá i teplota vzorku kapaliny, kterou měříme s přesností na 0,1 °C.

Přístroj se vyznačuje vysokou přesností měření (ne více než $\pm 1\%$ chyba) hodí se jak pro měření newtonských, tak i nenewtonských kapalin do velikosti viskozity 100 Pa · s. Můžeme měřit pěnové i pěnové vzorky, koloidní roztoky či tekoucí vzorky včetně tekutin při turbulentním proudění.

Vibrační viskozimetr CAMBRIDGE

Tento typ viskozimetru funguje na principu pohybu pístu ve zkoumané kapalině. Magnet ve formě pístu je ovládán elektromagnetickou silou, konkrétně se pohybuje střídavě nahoru a dolů podle toho, kterou ze dvou příslušných cívek (horní a dolní) zrovna prochází proud. Pohyb pístu je tlumen měřeným vzorkem a měřicí přístroj vyhodnocuje čas respektive rychlost pohybu pístu v měřicí komoře.

Velikou výhodou toho viskozimetru Cambridge je široký rozsah viskózního měření (od 0,2 – 20 000 cP). Nezáleží nám ani na zabarvení či zakalení zkoumané tekutiny, přičemž objem vzorku je velmi malý (pouze několik cm³). Měření je opakovatelné, dá se provozovat v širokém pásmu teplot (-60°C až 190°C) i tlaků (až desítky MPa). [7], [9], [11]



Obrázek 3.22 - Viskozimetr Cambridge [9]

A – řez viskozimetrem, B – fotografie snímače, C – řez elektromagnetem

3.3 MĚŘENÍ PĚNIVOSTI

Měření pěnivosti kapalin se provádí dle normy DIN 51 381. Metoda probíhá tak, že se vrstva vzorku zkoumané kapaliny provzdušňuje proudem vzduchu. Po stanovené době se proudění zastaví a změří se objem vytvořené pěny v mililitrech. Dále se pokračuje ve zkoušce již bez provzdušňování, zkoumá se tzv. stabilita pěny, která se určuje jako zbývající množství pěny v ml po předem definovaném čase (obvykle 10 minut) od zastavení provzdušňování. Po uplynutí času by měla veškerá pěna zmizet. Zkouška se provádí celkem třikrát za střídání teplot 25°C, 95°C a opět 25°C, abychom si ověřili, zda při teplotě 95°C nedošlo k oxidaci a ke zvýšení sklonu kapaliny k pění. [18]

3.4 MĚŘENÍ BODU TUHNUTÍ

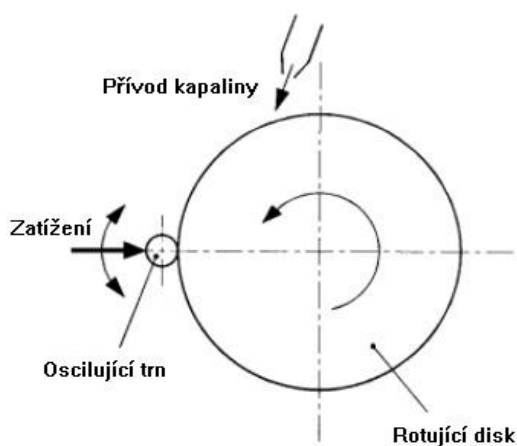
Tento parametr kapalin hydraulických soustav se určuje způsobem označeným normou ČSN 65 6072. Provedení testu je velmi jednoduché. Napřed kapalinu ohřejeme, následně ji začneme ochlazovat přesně stanovenou rychlostí a v intervalech po 3°C se v hranaté nádobě s vodorovnou ryskou vyzkouší tekutost vzorku kapaliny. Nejvyšší teplota, při které po naklonění nádoby není zjevný pohyb hladiny kapaliny, se volí jako hledaný bod tuhnutí. [6]

3.5 MĚŘENÍ MAZACÍ SCHOPNOSTI

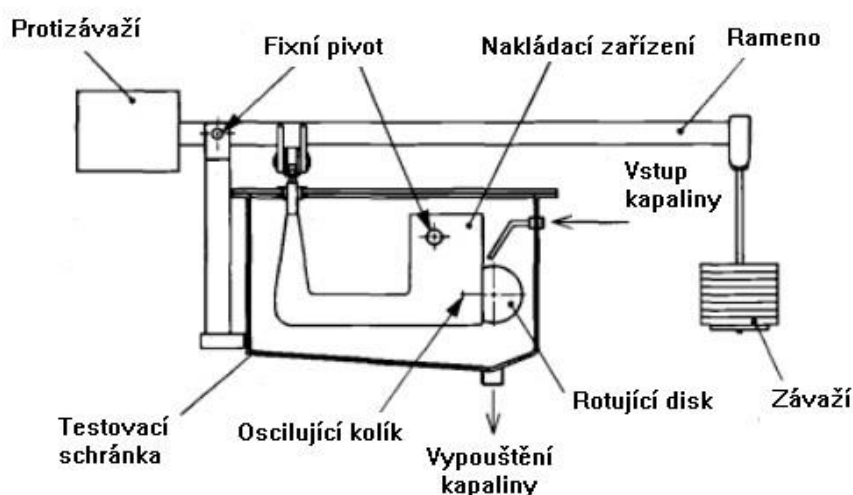
Mazací schopnosti hydraulických olejů se testují způsobem, jenž je označen německou normou DIN 51 389. Jedná se o tzv. Vickers-test, jenž je zároveň schválený i společností ISO. Princip metody spočívá v určení protiotěrových vlastností zkoumané kapaliny z opotřebení lamelového hydrogenerátoru.

Všechny části, jež při testu procházejí opotřebením, jsou plně vyměnitelné. Před započetím zkoušky se všechny lamely odváží na velice přesných analytických vahách. Hydrogenerátor zatížíme tlakem 14 MPa, viskozitu udržujeme na $13 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a po dobu 250 hodin necháme stroj pracovat. Během zkoušky vždy po určitých časových intervalech lamely odvažujeme a sledujeme hmotnostní úbytky, z nichž se následně vyhodnocuje mazací schopnost kapaliny. Přípustné opotřebení všech komponent je do 200 mg.

K měření mazací schopnosti byla společností **Vickers** navržena speciální konstrukce s názvem IUT AW-2 viz Obr. 3.23. Pracovní část, kam přivádíme hydraulickou kapalinu, se skládá z rotujícího kotouče o průměru 100 mm a oscilujícího trnu (nebo kolíku) o průměru 5 mm. Obě komponenty jsou vyrobeny z oceli, vytvrzeny, broušeny na drsnosti 0,2 - 0,4 Ra a kaleny na tvrdost 60-63 HRC. Trn je zatížen tak, aby působil konstantní tlak na rotující kotouč. Mezi obě pohybující se součástky je přiváděna hydraulická kapalina. [6], [20], [21]



Obrázek 3.23 - Detail pracovních částí přístroje IUT AW-2 [21]



Obrázek 3.24 - Schéma konstrukce přístroje společnosti Vickers [21]

3.6 MĚŘENÍ BODU VZPLANUTÍ

Jak jsme si již podrobně vysvětlili v Kapitole 2.1.9, dalo by se říct, že bod vzplanutí je nejnižší teplota, při které kapalina na krátkou chvíli vzplane a hned zhasne. Pro přesné určení bodu vzplanutí se v praxi využívá dvou metod:

- a) Clevelandova metoda (metoda otevřeného kelímku)
- b) Metoda Pensky-Martens

Clevelandova metoda

Jelikož se druhým názvem tato metoda nazývá „metoda otevřeného kelímku“, budou hrát v experimentu velkou roli. Začneme tím, že nalijeme vzorek zkoumaného média do zkušebního kelímku až po rysku vyznačenou na jejím obvodu. Začneme kelímek společně s kapalinou zahřívat, nejprve zvyšujeme teplotu poměrně rychle, poté pomalu s konstantním přírůstkem teploty za čas až do dosažení předpokládaného bodu vzplanutí. Při zkušebním teplotách přejíždíme plamenem těsně nad kelímkem. Nejnižší teplota, při které plamen způsobí zapálení par nad hladinou kapaliny, je považována za bod vzplanutí za podmínek atmosférického tlaku okolí. Užitím přepočtového Vztahu 3.24 a zaokrouhlením výsledku na celé číslo ve stupních Celsia se uvádí jako bod vzplanutí.

$$T_c = T_o + 0,25 \cdot (101325 - p) \quad (3.24)$$

T_c	bod vzplanutí korigovaný na atmosférický tlak 101 325 Pa [°C]
T_o	bod vzplanutí při atmosférickém tlaku okolí [°C]
p	atmosférický tlak okolí [Pa]

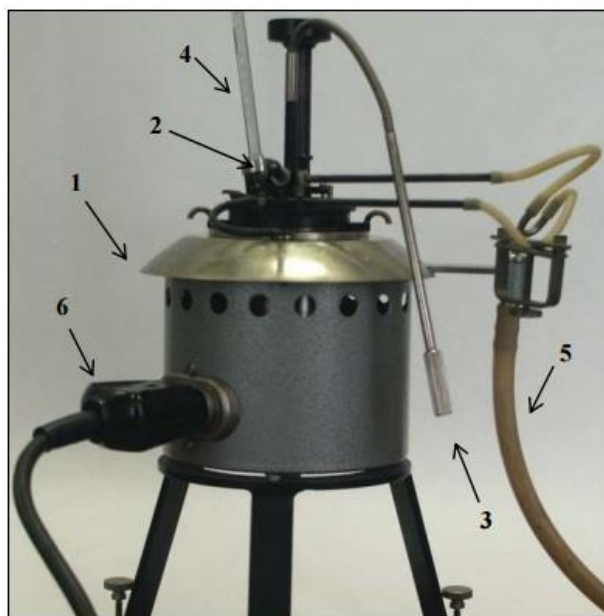
Metoda Pensky-Martens

O trochu sofistikovanější metodou na měření bodu vzplanutí můžeme považovat metodu pojmenovanou dle pánů Penskyho a Martense.

Před samotným měřením si připravíme vzorek. Zkoumané médium nalijeme do kelímku až po rysku, přikryjeme víčkem a vložíme do měřicího přístroje. Zkontrolujeme, zda je ustavovací a uzavírací zařízení ve správné poloze, poté vložíme teploměr a zapálíme pomocný plamen. Vzorek zahříváme rychlostí 5 – 6°C za minutu za stálého míchání při otáčkách 90 – 120 min⁻¹. Pomocí spouštěcího mechanismu sklopíme plamen do prostoru kelímku a vystavíme vzorek jeho vlivu po dobu 5s.

- a) Je-li teplota BV nižší než 104°C, začneme vzorek zkoušet plaménkem minimálně 17°C pod očekávaným BV a dále vždy po zvýšení teploty vzorku o 1°C.
- b) Je-li teplota BV vyšší než 104°C, začneme vzorek zkoušet plaménkem minimálně 17°C pod očekávaným BV a dále vždy po zvýšení teploty vzorku o 2°C.

Po dobu manipulace s ohněm se vzorek nesmí míchat. Jakmile vzorek na krátkou chvíli zřetelně vzplane (nezaměňovat se vznikem modravého pruhu, který občas vzplanutí předchází), odečteme hodnotu bodu vzplanutí z teploměru. Na závěr se změří hodnota barometrického tlaku v místnosti a v případě odchylky větší než 2 kPa se vypočítá hodnota korigovaného bodu vzplanutí dle Vztahu 3.24. [18]



Obrázek 3.25 - Přístroj na měření bodu vzplanutí metodou Pensky-Martense [18]

1 - kovová nádoba s topnou spirálou, 2 – plamen, 3 – míchadlo, 4 – teploměr, 5 – přívod plynu, 6 – přívod elektřiny s regulací ohřevu

3.7 MĚŘENÍ OXIDAČNÍ STÁLOSTI

Stav oxidační stálosti určujeme pomocí oxidační zkoušky dle normy ČSN 65 6235. Při zkoušce hodnotíme dobu, za kterou stoupne kyselost vzorku oleje na 2 mg KOH/g při definovaných podmínkách zkoušky. Zkouška obvykle probíhá 1200 hodin. Počet hodin potřebný k dosažení 2 mg hydroxidu draselného na 1 gram testovaného oleje se nazývá „odolnost proti oxidaci“.

Postup zkoušení vzorku probíhá následovně: zkušební aparaturu naplníme vzorkem oleje a destilovanou vodou, do oleje položíme 2 dráty (jeden z oceli, druhý z mědi), které mají funkci katalyzátoru. Destilovanou vodu, která temperuje vzorek, zahřejeme na teplotu 95°C. Jakmile je dosaženo teploty 95°C začne se do vzorku vhánět kyslík. Po každých 160 hodinách změříme číslo kyselosti vzorku. Zkouška končí v okamžiku, kdy hodnota čísla kyselosti dosáhne 2 mg KOH/g. [6]

3.8 MĚŘENÍ ČÍSLA KYSELOSTI

Číslo kyselosti kapalin určujeme zkouškou dle normy ČSN 65 6233. Měření probíhá následovně: do titrační skleněné baňky si navážíme určité množství oleje s přesností na 0,0001g, následně přidáme diethylether a vzorek důkladně promícháme. Přidáme fenolftalein a se vzorkem třepeme po dobu 1 minuty. Ihned titrujeme roztokem hydroxidu draselného až do růžového zbarvení. Množství spotřebovaného KOH si zapíšeme. Číslo kyselosti se vyjádří jako množství KOH v g potřebného k neutralizaci 100 g vzorku oleje a vypočítá se dle vztahu:

$$\check{K} = \frac{56,11 \cdot V \cdot c}{m} \quad (3.25)$$

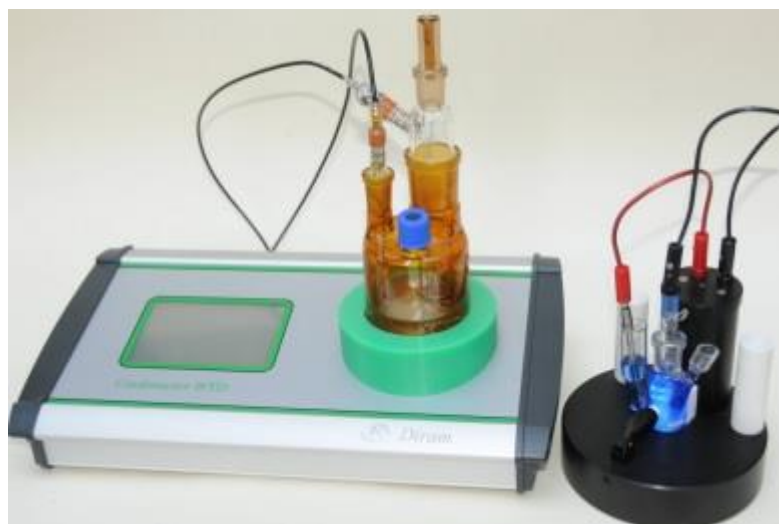
m hmotnost navážky [g]

c koncentrace hydroxidu draselného o hodnotě $c = 0,1 \text{ mol/l}$ [mol/l]

V spotřeba hydroxidu draselného o koncentraci $c = 0,1 \text{ mol/l}$ [ml]

Modernějším přístupem v měření čísla kyselosti je použití přístroje s názvem **Coulometer**. Při coulometrickém stanovení čísla kyselosti je titrační činidlo přímo generováno na platinové elektrodě rozkladem vody. Důležité je, že neutralizace probíhá v uzavřeném katodickém oddělení elektrolytu, kde je eliminován vliv vzduchu. Titrační roztok tvoří směs toluenu, alkoholu a solí elektrolytu.

Výhodou metody je malá spotřeba rozpouštědel a vysoká přesnost odměřování reakčního činidla. Ekvivalence je určena **spektrofotometrickou indikací** za využití acidobazického indikátoru, jež nám umožňuje správné vyhodnocení konečného bodu titrace i při měření tmavých olejů. [6], [19], [29]



Obrázek 3.26 - Coulometer WTD [29]

3.9 MĚŘENÍ KOROZIVNÍHO PŮSOBENÍ

Míru korozivního působení ropných produktů na materiály určujeme dle dvou norem ČSN:

- a) ČSN 65 6074 Ropné výrobky – Stanovení korozivního působení na kovy
- b) ČSN 65 6075 Ropné výrobky – Korozivní působení na měď

Zkouška ochranné schopnosti proti rezivění

Při této zkoušce, která vznikla původně za účelem zkoušení turbinových olejů, se hodnotí schopnost oleje chránit vyleštěný povrch zkušebního tělíska z oceli v přítomnosti vody a za zvýšené teploty. Zkouška probíhá po dobu 24 hodin a dle výsledného vzhledu zkušební vzorku materiálu posuzujeme schopnost ochrany proti rezivění.

Zkouška korozivního působení na měď

Zkouškou zjišťujeme působení sirných sloučenin v oleji na měď. Průběh zkoušky probíhá tak, že po dobu 3 hodin vystavíme vyleštěný pásek z mědi působení oleje za teploty 100°C. Dle následných změn vzhledu zkušební povrchu určíme intenzitu korozivního působení. Za nepřijatelné považujeme vytvoření sytě černého povlaku, hraniční je vznik zelených skvrn, ještě únosné jsou skvrny se zabarvením do modra. [5], [18]

3.10 MĚŘENÍ SNÁŠENLIVOSTI S ELASTOMERY

Snášlivost olejů s elastomery se zkouší dle normy ČSN ISO 1817. Zkouška probíhá tak, že vzorek pryže ponoříme do kapaliny zahřáté na 100°C. Zkouška probíhá po dobu 1000 hodin. Zajímá nás hmotnostní nebo objemový přírůstek či úbytek vzorku pryže. Limitními hodnotami jsou pro nás -1% a +5% změny objemu vzorku.

Na stejném principu funguje i zkouška dle normy ISO 6072. Jediným rozdílem je doba zkoušky, která je zkrácena na 168 hodin. Tento test vystupuje ve světě pod různými názvy, můžeme se setkat s pojmenováním DVI (Dichtungsverträglichkeits-Index) či ECI (Elastomer Compatibility Index). [5], [6]

3.11 MĚŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ HYDRAULICKÝCH KAPALIN

V obecné praxi používání hydraulických soustav víme, že jejich jednotlivé komponenty prochází v průběhu času určitým opotřebením. Toto opotřebenění je způsobeno nečistotami, jež jsou obsaženy v hydraulických kapalinách, a zpravidla bývají i příčinou poruch a závad. V důsledku opotřebenění dochází k snižování tlaku v obvodu, zvětšování vůle, zadírávání kluzných ploch, které může vést až k úplné nefunkčnosti řízení hydraulického systému.

Nároky na čistotu hydraulické kapaliny nám určuje citlivost jednotlivých komponent hydraulického systému, která by měla být definována výrobcem. Rozhodujícím činitelem je však

tlak, při kterém budeme dané zařízení provozovat. Konkrétně pro provozní tlak 20 MPa byla vytvořena Tab. 3.1, která nám určuje třídu čistoty pro různé komponenty soustavy. V případě vyššího provozního tlaku se doporučuje zvýšit filtraci o 1 třídu. V některých případech se dokonce doporučuje plnění nové hydraulické kapaliny do systému přes filtrační zařízení o velikosti otvorů 3-5 μ m.

Tabulka 3.1 – Třídy nečistoty pro tlak 20 MPa [20]

Hydraulické prvky	Požadovaná filtrace ISO/NAS	Doporučená absolutní filtrace [μ m]
Axiální pístová čerpadla	21/18/15; 9	10
Zubová čerpadla	21/18/15; 9	10
Lamelová čerpadla	20/17/14; 8	10
Rozvaděče el. ovládané	21/18/15; 9	10
Škrťací ventily	21/18/15; 9	10
Proporcionální ventily	20/17/14; 8	10
Servoventily	17/14/11; 5	5

Dnes provádíme testování hydraulických kapalin na znečištění pomocí norem ISO 4406, ISO 4407 a NAS 1638.

Dle normy **ISO 4406** se stanovuje množství částic v 1 ml kapaliny, a to částí o velikosti větší než 4 μ m, > 6 μ m, > 14 μ m. Jejich speciální značení vyjadřuje množství a velikost částic znečištění v kapalině, např. 21/18/15 (počet částic: > 4 μ m je 10 000–20 000, > 6 μ m je 1 300–2 500, > 14 μ m je 160–320).

Základem **ISO 4407** je optické měření částic (mikroskopem). Metoda se nazývá **absolutní filtrace** a sledujeme u ní částice velikostí >5 μ m a >15 μ m. Jejich značení může vypadat následovně: -/18/15.

Třetí často využívanou metodou je **NAS 1638**. Posuzujeme u ní množství nečistot v 100 ml kapaliny. Sledované částice rozdělujeme do 6 skupin podle velikosti : 2–5 μ m, 5–15 μ m, 15–25 μ m, 25–50 μ m, 50–100 μ m, > 100 μ m. K jednotlivým rozsahům je stanoven počet částic např.: 2–5 μ m – NAS 7 (počet částic od 80 000 do 160 000); 5–15 μ m – NAS 8 (počet částic od 32 000 do 64 000); 15–25 μ m – NAS 7 (počet částic od 2 850 do 5 700). Následně se vybere nejvyšší naměřená NAS, která je naší hledanou hodnotou. [14], [20]

3.11.1 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE

Kód čistoty ve svém zápisu zahrnuje počet, velikost a rozložení pevných částic v oleji. Musíme počítat i s tím, že ne všechny přístroje umí měřit skutečný obsah nečistot v kapalině. Přesto na základě empirických znalostí hydraulických kapalin vzniklo pár metod, kterými jsme schopni vyhodnocovat data o čistotě kapalin:

- a) metoda absolutní filtrace
- b) světelné absorpční metody

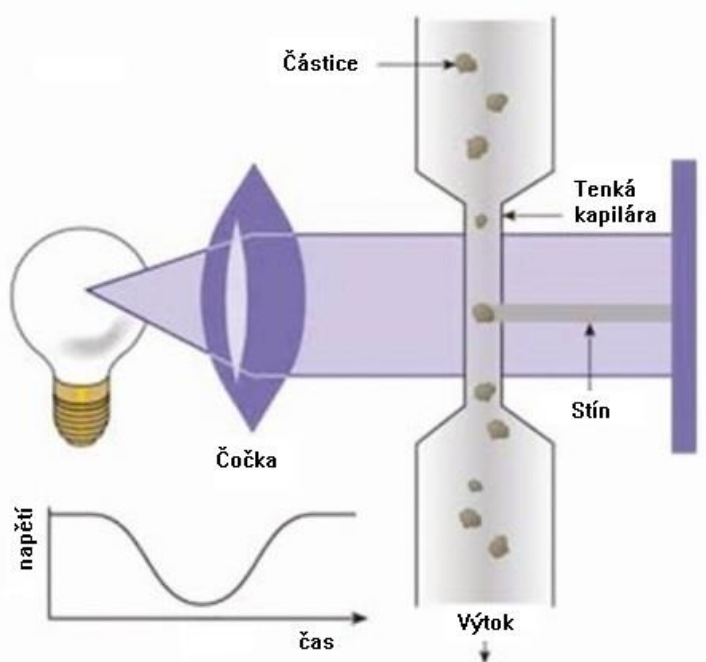
Metoda absolutní filtrace

Metoda absolutní filtrace se dá provádět dvojím způsobem. První používá k práci automatického **mikroskopu** (norma ISO 4407), který vyhodnocuje data z počtu částic a jejich rozměrové distribuce v hydraulické kapalině, jež byla přefiltrována přes membránový filtr 0,8 μm . Výhodou metody je eliminování vlivu vody i vzduchu v kapalině a každá měřená plocha je zároveň zobrazována na monitoru. Nevýhodou je však pracnost, časová náročnost, nemožnost měřit tmavé oleje.

V druhém případě se pracuje se vzorkem maziva, jenž je čerpán za konstantního tlaku přes **soustavu sít** s kalibrovanou porézností – pozorujeme pokles rychlosti, nebo sledujeme tlakovou ztrátu na sítích při konstantní rychlosti průtoku.

Světelné absorpční metody

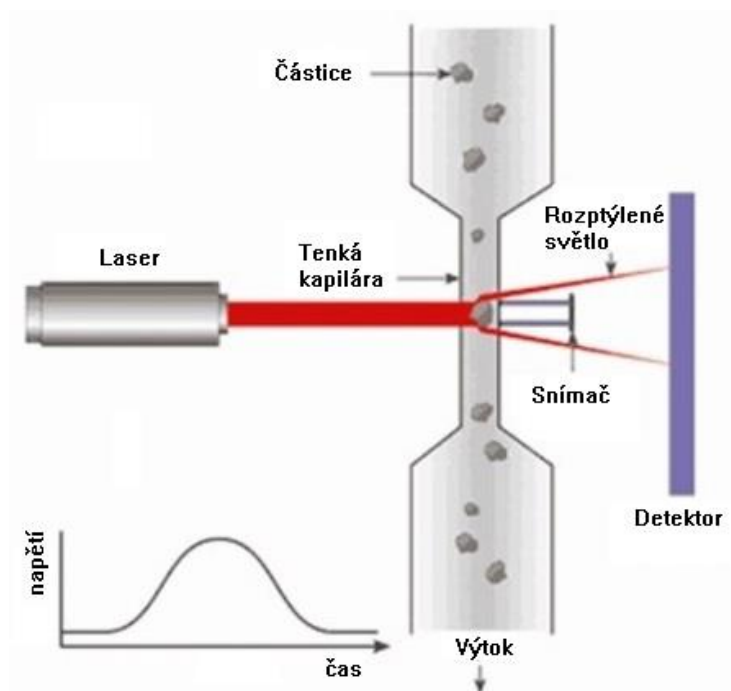
Jednou ze světelných absorpčních metod je **metoda detekce snížení intenzity světla**. Funguje na principu průtoku konstantního množství měřené kapaliny tenkou kapilárou. Jelikož je kapilára z vnějšku osvětlena, velikost stínu, jenž vrhá částice (znečištění) je úměrná poklesu energie dopadající na detekční snímač.



Obrázek 3.27 - Metoda snížení intenzity světla [20]

Dalším typem světelných absorpčních metod je **metoda světelného rozptylu** a využívá se u ní laserového paprsku. Tyto paprsky jsou koherentní a monochromatické. Podobně jako u předchozí metody protéká zkoumaná kapalina tenkou kapilárou, na níž je namířen paprsek laseru.

Mechanické částice, jež projdou paprskem laseru, jsou v důsledku vzniku světelného rozptylu detekovány na detektoru.



Obrázek 3.28 - Metoda světelného rozptylu [20]

Za velkou nevýhodu světelných metod můžeme považovat jejich tendenci měřit i tzv. **falešné částice**. To znamená, že světelný tok během měření nesnímá pouze pevné částice, ale i bublinky vzduchu, vodu a v některých případech i aditivní složky. Proto se zkoumaná kapaliny musí vždy řádně před měřením připravit (odvzdušnit, zbavit vody, naředit ředidlem), jinak mohou být výsledky ovlivněny a zhoršit tak výsledky kód čistoty. [20]

4 HYDRAULICKÉ SOUSTAVY LETADEL

Hydraulické systémy se používají v letectví již od začátku 30. let minulého století, kdy byl světu poprvé představen výsuvný podvozek. Od té doby se počet aplikací hydrauliky v letadlové dopravě značně rozrostl. Dnes hrají velikou roli především v řídicích systémech civilních i armádních letadel, kde je kladen důraz na spolehlivost a ovladatelnost letadel.

Užití hydraulických systémů se dnes jeví jako nejefektivnější zdroj energie pro pohon primární i sekundární řídicí jednotky, podvozku, brzd i protismykového systému. Jejich hlavní předností je nízká hmotnost, nízká cena, malé nároky na údržbu a vysoká spolehlivost. Přes všechny tyto výhody se předpokládá, že v budoucnosti budou hydraulické systémy v některých oblastech nahrazeny systémy elektrickými. [14]

4.1 ŘEŠENÍ HYDRAULICKÉHO OBVODU

Hydraulické energie se dnes již využívá ve většině letadel. Použití může být různé, aplikování hydrauliky je především ovlivněno snahou o bezprostřední bezpečné fungování letadla. Přístroj nesmí fungovat nesprávně, tzn. musí fungovat, když je ovládán a naopak, také nesmí vypovědět svou funkci, pokud dojde k menší závadě. Tyto požadavky společně s parametry letadla určují výsledné požadavky na návrh hydraulického systému. Typickými příklady aplikací v letadlech, ve kterých se používá hydraulických systémů:

Primární řídicí systémy:

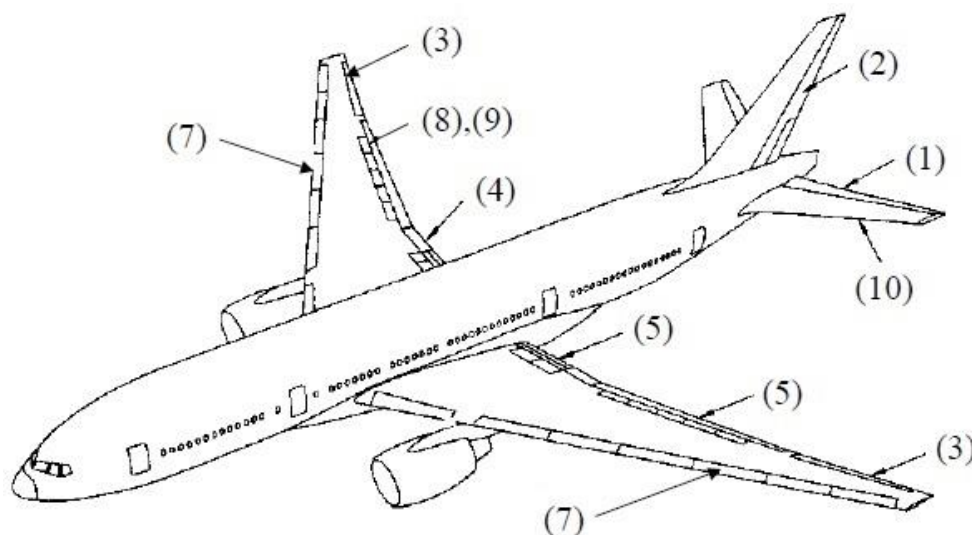
- výškové kormidlo (1)
- směrové kormidlo (2)
- křídélka (3)
- flaperony (4)
- kachní plochy

Sekundární řídicí systémy:

- klapky (5)
- sloty (7)
- rušič vztlaku (8)
- vzdušné brzdy (9)
- stabilizátor (10)

Vybavení:

- brzdy
- ovládání kormidel
- dvířka pro náklad
- schody pro pasažéry



Obrázek 4.1 - Užití hydraulických systémů v letadle [14]

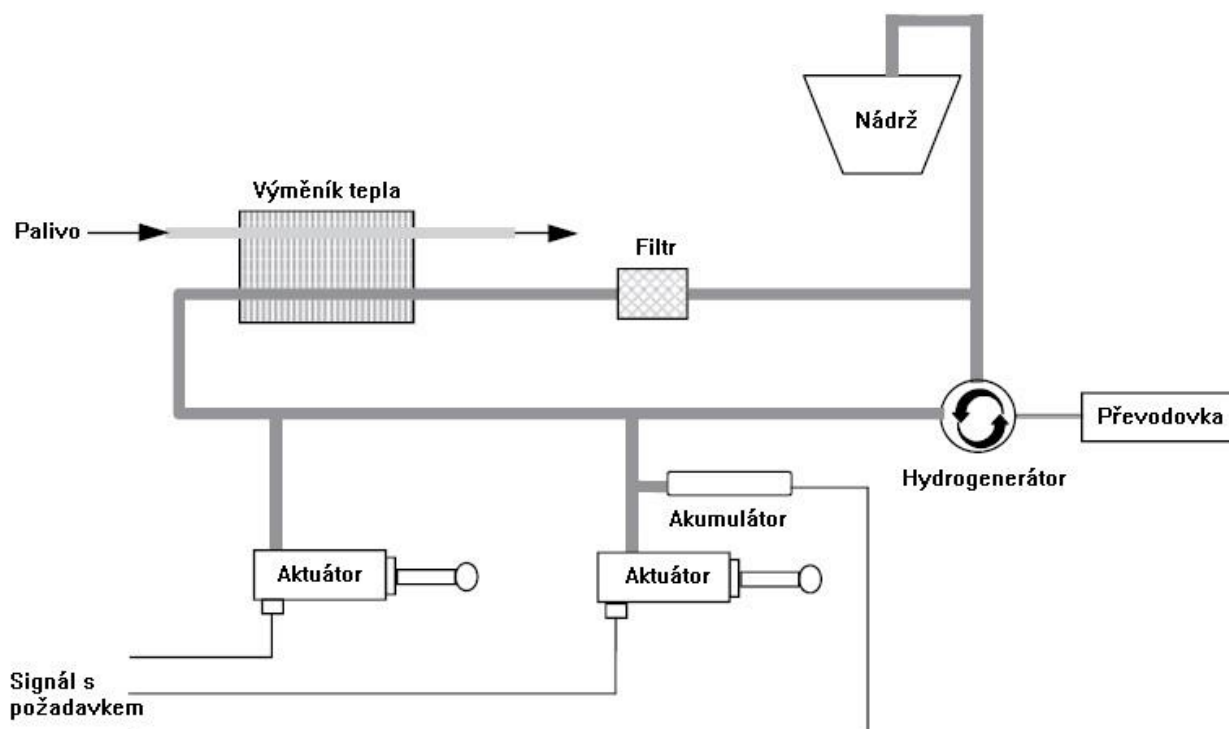
Z uvedeného seznamu prvků využívajících hydraulického pohonu vyplývá, že všechny prvky z kategorie primárních řídicích systémů (včetně klapek a vztlačových klapek z kategorie sekundárních řídicích systémů) jsou části nezbytné pro let a jeho bezpečnost, a žádná, byť malá porucha nesmí zabránit, nebo dokonce jen přerušit, jejich správnému fungování.

Z hlediska správné funkce hydraulických soustav, je potřeba zohlednit při jejich konstruování tyto parametry:

- a) tlak – určen použitou technologií a příslušnou normou
- b) integrita – zajímá nás bezpečnost a postradatelnost částí systému, určuje počet nezávislých pohonných jednotek či nutnost užití záložního zdroje energie
- c) průtok – určení množství i rychlosti kapaliny dle typu jejího pohybu v systému
- d) pracovní cyklus – poměr spotřeby energie ve srovnání s klidovými podmínkami (očekává se velká spotřeba energie na primární řídicí letové úkony a nižší např. na ovládání podvozku)
- e) nouzové použití – je zde požadavek na záložní zdroj energie v případě, že by primární zdroj selhal (v tomto případě se používá např. hydraulický poháněný elektrický generátor)
- f) tepelné zatížení a disipace – množství energie nebo tepla, kterými části hydraulické soustavy přispívají k ohřevu pracovní kapaliny

Analýza těchto aspektů nám umožňuje provést volbu počtu komponent a jejich typu pro kompletaci celé hydraulické soustavy. Soustava zahrnuje tyto části:

- a) zdroj energie – motor, pomocná pohonná jednotka nebo vzduchová turbína
- b) nádrž
- c) filtr
- d) distribuční systém – potrubí, ventily
- e) tlakové a teplotní senzory
- f) zařízení pro chlazení oleje
- g) prostředek vykonávající funkci hydraulické soustavy – aktuátory, motory, čerpadla
- h) prostředek pro uložení energie – akumulátor



Obrázek 4.2 - Schéma jednoduché hydraulické soustavy [14]

Primárním zdrojem energie letadla je motor, hydrogenerátor je propojen s převodovkou. To zabezpečuje dodávání pracovní kapaliny potrubím o určitém průtoku a tlaku do dalších zařízení. Podstatnou úlohou nádrže je zajistit bezpodmínečný stabilní přísun hydraulické kapaliny do hydrogenerátoru.

K zajištění požadované bezpečnosti provozu se dnes používá soustav nejméně s dvěma hydraulickými okruhy. U armádních letadel se můžeme setkat s dvěma na sobě nezávislými okruhy, u velkých dopravních letadel se třemi a více okruhy. [14]

4.2 HYDROGENERÁTORY

Hydrogenerátory neboli hydraulická čerpadla slouží k přeměně mechanické energie na energii tlakovou. V každém hydraulickém systému je použito minimálně 1 a více čerpadel. Rychlost čerpání přímo souvisí s otáčkami motoru, čerpadlo by tedy mělo umět pracovat v širokém rozsahu otáček.

Účinnost hydrogenerátoru je definována:

$$\eta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{Q \cdot (p_2 - p_1)}{M_k \cdot \omega} = \frac{Q \cdot \Delta p}{M_k \cdot 2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{Q}{n \cdot V_g} \cdot \frac{\Delta p \cdot V_g}{M_k \cdot 2 \cdot \pi} \quad (4.1)$$

η_Q ... průtoková účinnost [–]

η_p ... tlaková účinnost [–]

Q skutečný průtok hydrogenerátoru [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_t teoretický průtok [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

Q_s svodový proud (průtokové ztráty) [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]

p_2 tlak na výstupu hydrogenerátoru [Pa]

p_1 tlak na vstupu hydrogenerátoru [Pa]

Δp rozdíl tlaků [Pa]

M_k krouticí moment [Nm]

ω úhlová rychlost [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$]

V_g geometrický objem (objem, který projde hydrogenerátorem za 1 otáčku) [m^3]

$$\eta_p = \frac{\Delta p \cdot V_g}{M_k \cdot 2 \cdot \pi} \quad (4.2)$$

η_Q průtoková účinnost [–]

$$\eta_Q = \frac{Q}{Q_t} = 1 - \frac{\sum Q_s}{Q_t} = \frac{Q}{n \cdot V_g} \quad (4.3)$$

η_p tlaková účinnost [–]

[3], [4], [14]

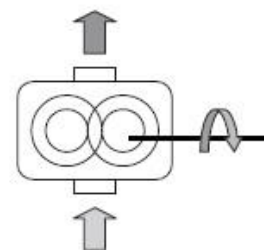
4.2.1 ZUBOVÉ HYDROGENERÁTORY

Jedním z nejvyžívanějších typů hydrogenerátorů v průmyslu jsou hydrogenerátory zubové. Pracují na principu přesunu malých objemů tekutiny mezi zuby jednoho či více ozubených kol otáčejících se v uzavřené komoře se vstupem i výstupem.

Pomocí znalosti jednoduchých vztahů, v kterých vystupují parametry čerpadla (počet a velikost zubů kol), jsme schopni vypočítat objem přenesené tekutiny za jednu otáčku.

Obecné vlastnosti zubových hydrogenerátorů:

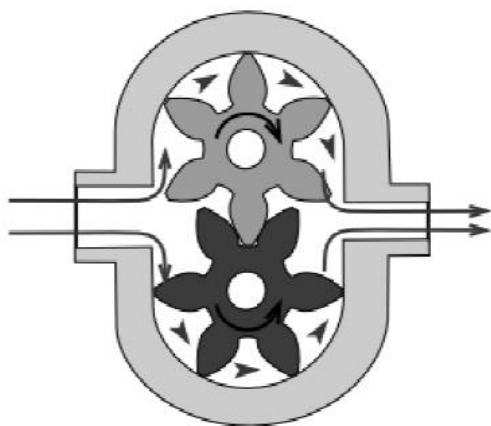
- snadná regulace
- plynulý, kontinuální průtok
- vhodné pro čerpání obtížně tekoucích médií



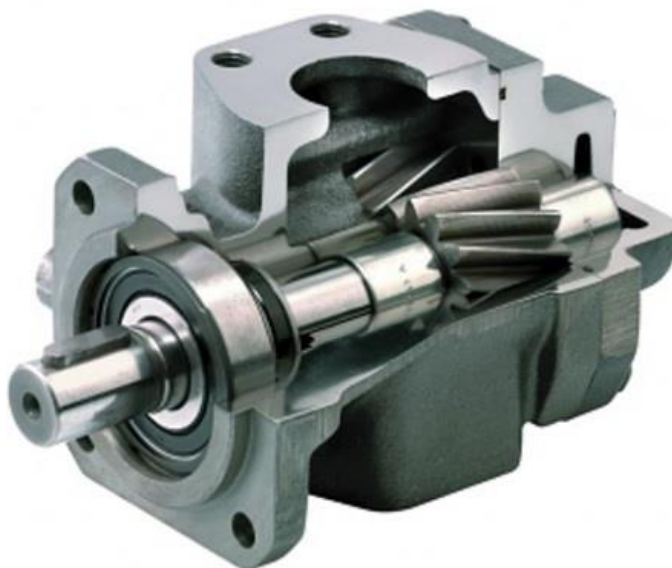
Obrázek 4.3 - Schéma zubového hydrogenerátoru [14]

Zubové hydrogenerátory s vnějším ozubením

Zubové hydrogenerátory s vnějším ozubením fungují na principu dvou stejných vzájemně rotujících kol. Na vstupu (u sání) jejich zuby vcházejí do společného záběru a proti stěně pracovní komory vytvářejí prázdné kapsy. Vlivem přetlaku se zubové mezery naplní tekutinou, která putuje přes zuby kol, okolo vnějšího obvodu komory až do výstupu čerpadla.



Obrázek 4.4 - Schéma zubového hydrogenerátoru s vnějším ozubením [4]



Obrázek 4.5 - Ukázka zubového hydrogenerátoru s vnějším ozubením [15]

Použití tohoto typu zubového čerpadla se vyplatí především pro čerpání olejů a jiných víceviskózních kapalin. Ty umí zcela zaplnit prostor v pracovní komoře čerpadla a eliminují tak vlivy tření. Výsledkem je pak velmi přesné dávkování. Naopak se nedoporučuje čerpání tekutin o nízké viskozitě, při nichž by se mechanismus mohl zadřít.

Zubové hydrogenerátory s vnitřním ozubením

Tento mechanismus přenáší čerpanou tekutinu pomocí dvou do sebe zasazených ozubených kol: vnějšího ozubeného kola poháněného externím motorem a vnitřního ozubeného kola – pastorku, jenž je poháněn rotorem. Ve volném prostoru mezi nimi se nachází čerpaná kapalina a srpkovitý oblouk (tvar půlměsíce), který zabraňuje pulsování toku kapaliny. Proto je průtok i generovaný tlak velmi stálý.

Všechna zubová čerpadla s vnitřním ozubením se vyznačují **samonasáváním**, tzn. čerpadlo si pracovní médium přitáhne samo, nemusí být přiváděno jiným mechanismem. Tento typ se hodí pro čerpání kapalin o vysokých viskozitách i teplotách (až 400°C) za nízkých tlaků. Z důvodu velmi přesných výrobních tolerancí je možné krátkodobě provozovat chod mechanismu i „na sucho“.



Obrázek 4.6 - Ukázka zubového hydrogenerátoru s vnitřním ozubením [15]

Zubové hydrogenerátory typu Gerotor

Gerotorový hydrogenerátor se stejně jako předchozí dva typy čerpadel skládá ze dvou rotujících ozubených kol. Jedním je vyoseně uložené hnací kolo s vnějším ozubením připojené hřídeli k pohonu a druhé je pastorek s vnitřním ozubením, jenž je poháněn rotorem uvnitř pevného pouzdra. Jelikož má o jeden zub méně jak rotor, pohybuje se pomaleji.

Hlavní výhodou těchto hydrogenerátorů je možnost obousměrného provozu, malé rozměry čerpadla, spolehlivý provoz a hlavně plynulý a tichý provoz.

V letectví se používá pouze zřídka. Jedním z výrobců, který se na tento typ hydrogenerátorů pro aplikace v letectví specializuje je společnost **Nichols Airborne Division**, která gerotorových hydrogenerátorů využívá k mazání a chlazení převodovek či kriticky zatížených ložisek. Jejich technologie zaručuje vysokorychlostní plnění při nízkých tlacích, nízké hmotnosti zařízení i ceně provozu a vysoké spolehlivosti. [14], [15], [27]



Obrázek 4.7 - Ukázka zubového hydrogenerátoru typu Gerotor [15]

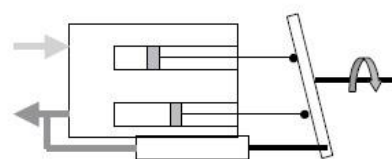
4.2.2 PÍSTOVÉ ROTAČNÍ HYDROGENERÁTORY

Doposud jsme se zabývali pouze čerpadly, která byla určena pro aplikace při nízkých, maximálně středních tlacích v řádu desítek barů. Na práci při vysokých tlacích tu máme typ pístového hydrogenerátoru, který je schopen pracovat s tlaky až okolo 700 barů.

S pístovými rotačními hydrogenerátory se můžeme setkat ve dvou základních provedeních: pístové axiální a pístové radiální hydrogenerátory.

Obecné vlastnosti rotačních pístových hydrogenerátorů:

- schopno práce při vysokých tlacích
- nižší průtoky
- nejsou tolerantní vůči znečištění
- často používaný typ čerpadel v letectví



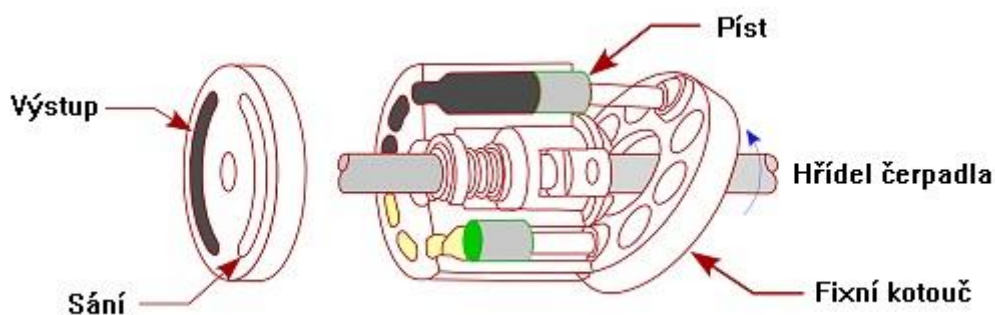
Obrázek 4.8 - Schéma rotačního pístového hydrogenerátoru [14]

Axiální pístové hydrogenerátory

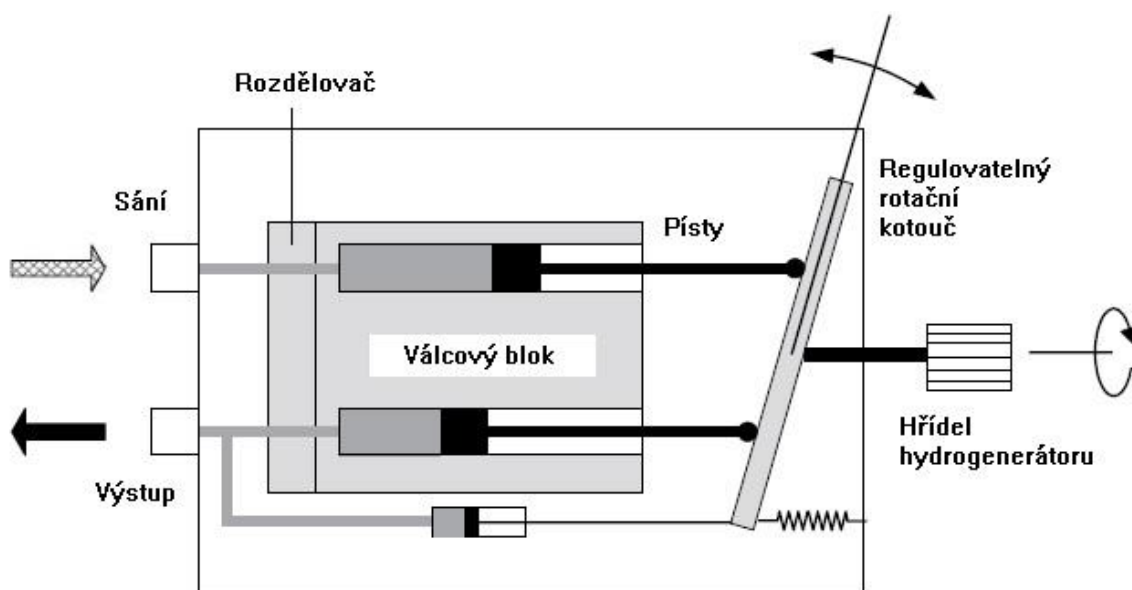
Tento typ pístových hydrogenerátorů využívá rotačního pohybu šikmo postaveného kotouče, který generuje postupný periodický zdvih několika pístů umístěných v pouzdře v ose s hřídelí. Písty jsou v tomto případě umístěny jako komory v bubínkovém revolveru a postupným otáčením šikmého kotouče dochází k střídavému zatlačování a uvolňování jejich pístnice. V první

polovině periody cyklu dochází k uvolňování pístů, jejich pohybu směrem k rotujícímu kotouči a čerpání kapaliny ze sání. V druhé polovině periody jsou písty stlačovány a látka je dopravována směrem k výstupu za vysokého tlaku.

V praxi se můžeme setkat s těmito variantami provedení axiálních rotačních pístových hydrogenerátorů: s otáčivými písty, s otáčivým kotoučem, s vyosenou hřídelí/nakloněným kotoučem.



Obrázek 4.9 - Schéma axiálního rotačního pístového hydrogenerátoru s rotačními písty a fixním kotoučem [34]



Obrázek 4.10 - Schéma axiálního rotačního pístového hydrogenerátoru v provedení s otáčivým šikmým kotoučem [14]

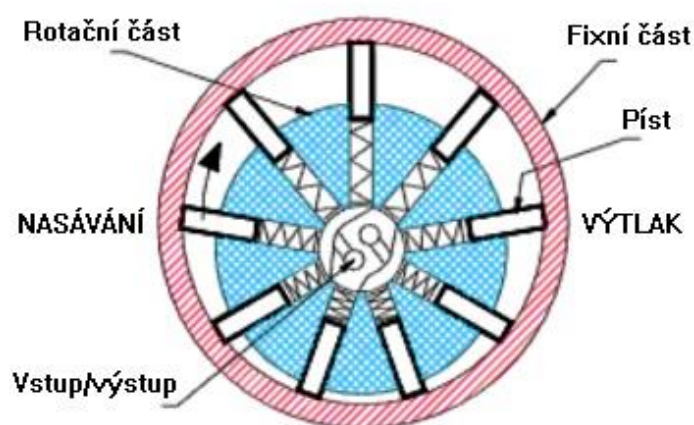
Radiální pístové hydrogenerátory

Písty směřující kolmo na osu rotace otáčející se hřídele a paprskovitě vybíhají nebo jsou zatlačovány vlivem působení tlačných pružin a pracovní komory, kterých se cyklicky dotýkají kvůli excentrickému umístění hřídele v komoře.

V první polovině periody cyklu se píst vzdaluje od středu rotace hřídele a probíhá čerpání kapaliny ze sání. Tuto kapalinu následovně v druhé polovině cyklu při zpětném pohybu směrem dolů píst vytlačuje do výstupu.

Výhoda radiálního pístového hydrogenerátoru oproti axiálnímu typu je především v možnosti použití většího počtu pístů, jejichž vlivem snižujeme pulsaci průtoku kapaliny. Očekáváme převážně konstrukci kratší s větším průměrem, kvůli složitosti mechanismu bude čerpadlo i dražší na výrobu.

V hydraulických soustavách letadel se často tohoto typu hydrogenerátoru nevyužívá. [14], [34]



Obrázek 4.11 - Průřez radiálních pístovým hydrogenerátorem [34]

4.3 HYDRAULICKÁ NÁDRŽ

Požadavky na tuto část hydraulické soustavy jsou kladeny v závislosti na typu letadla. Pro většinu armádních a akrobatických letadel se využívá nádrže (zásobníku) **aerobatické**. To znamená, že kapalina uvnitř zásobníku nesmí být ovlivněna rozhraním vzduch/kapalina a musí být zajištěn nepřetržitý přísun kapaliny do systému ve všech výškách i přetíženích g.

Nádrž slouží jako zásobník, chladič, umožňuje unikání plynů z kapaliny i usazování nečistot. Vždy je navrhována dle příslušných norem, do výpočtů zahrnujeme vliv všech diferenčních objemů v systému a tepelné roztažnosti kapaliny. Z hlediska zajištění dostatečného vstupního tlaku do hydrogenerátoru bývají nádrže přetlakové. [4], [14]

4.4 TECHNICKÝ STAV KAPALINY

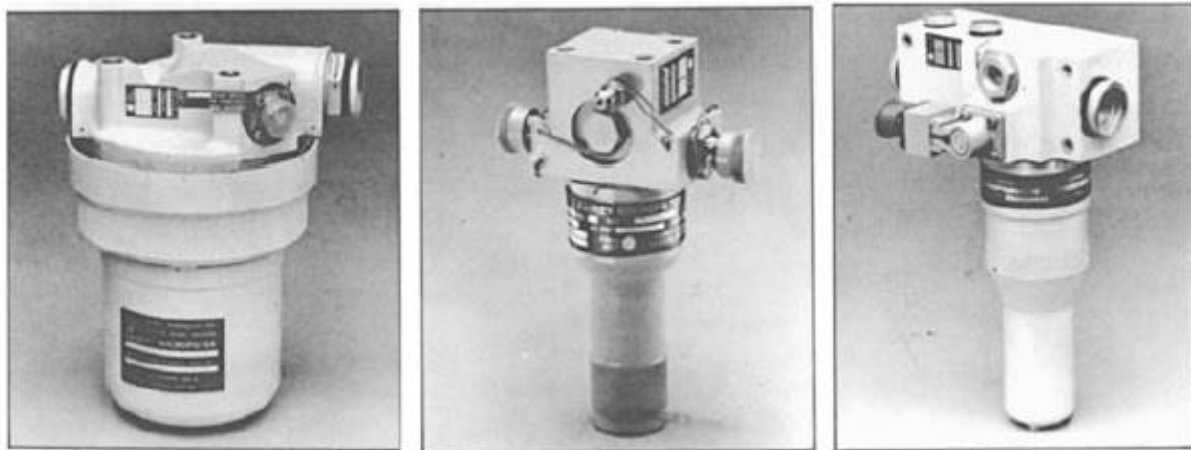
Za normálních provozních podmínek musíme provádět chlazení a čištění hydraulických kapalin. Pro chladicí účely se využívá výměníků tepla. Pokud stojí letadlo na zemi, probíhá výměna tepelné energie mezi olejem a palivem pomocí výměníku tepla. Za letu se dá k chlazení pracovní kapaliny využívat okolního vzduchu.

Největší generování tepelné energie můžeme očekávat za vysokých tlaků a při tzv. škrcení. Teplo je odváděno potrubím společně s kapalinou až do nádrže. Před vstupem do nádrže je důležité kapalinu ochladit, aby se nám nezvyšovala celková teplota kapaliny v okruhu.

V rámci údržby hydraulického systému a její kapaliny se provádí i tzv. **deaerace** nádrže, kde se mohou hromadit plyny, které mají neblahý vliv na kvalitu kapaliny.

Požadavek na vysokou čistotu hydraulických kapalin a tudíž jejich filtrování přišel se zavedením servo-pohonů do leteckého provozu. Výrobci filtrů na to reagovali výrobou filtračních prvků z pryskyřicí lepeného papíru vyztuženého ocelovými trubičkami a drátovou sítí. Tento filtrační prvek je velmi pevný a je schopen odolat zátěži o velikosti tlaku až 1,5krát v hydraulickém systému. Tyto filtry jsou schopny zadržet všechny částice velikosti nad 5 mikronů a vysoké procento částic menších.

Z hlediska měření čistoty kapaliny existuje několik kategorií, kde rozlišujeme mezi množstvím nečistot a velikosti jejich částic. Obvykle to jsou kategorie: 5-15 mikronů, 15-25 mikronů, 25-50 mikronů, 50-100 mikronů, 100 mikronů a více, které posuzujeme v kapalině o objemu 100ml (viz Kapitola 3.11). Bohužel neexistuje žádný způsob, jak matematicky vypočítat závislost mezi absolutním množstvím nečistot a čistotou kapaliny. Proto nám nezbývá nic jiného než se uchýlit k empirickým znalostem kapalin a jejich testování. [14]



Obrázek 4.13 - Filtrační jednotky hydraulických soustav [14]

5 PRACOVNÍ KAPALINY

5.1 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH PRACOVNÍCH KAPALIN

Historicky prvním médiem používaným v hydraulických zařízeních byla voda. Teprve od 20. století se začíná využívat nových tekutin, například minerálního oleje. Na základě rozdílných vlastností těchto dvou látek byla vypracována Tab.5.1.

Tabulka 5.1 - Protichůdné vlastnosti vody a minerálního oleje [3]

Vlastnosti	Olej	Voda
vhodná viskozita	1	0
mazací schopnost	1	0
antikoroziční působení	1	0
hořlavost	0	1
ekologická nezávadnost	0	1
cena	0	1

V hodnocení vystupuje pouze několik nejvýznamnějších vlastností, které byly jednoduše hodnoceny známkou 1 nebo 0 (splňuje-nesplňuje). Z výsledků nám vyplývá, že minerálního oleje využijeme především tam, kde je potřeba splnit požadavky na vhodnou viskozitu (vznik kapalinového tření u kluzných dvojic, vyšší životnost, nižší opotřebení), mazací schopnosti (při velkých tlacích, vysoké rychlosti, odolnost proti zadírání) a antikoroziční působení. Zato voda bude využita tam, kde je kladen důraz především na nehořlavost, ekologickou nezávadnost a nízkou cenu, přičemž musí být eliminovány její negativní vlastnosti.

Zdálo by se, že spojením vody a minerálního oleje vytvoříme emulzi s ideální kombinací vlastností jejich složek, výsledek však není tak uspokojujivý, jak by se dalo předpokládat.

Bylo tedy potřeba hledat nová vhodná media pro hydraulická zařízení, která by splňovala vysoké požadavky techniků. Na řadu přišly bezvodé syntetické kapaliny, směsi polyglykolů s vodou a vývoj v tomto směru stále pokračuje. [3]

5.2 MINERÁLNÍ OLEJE

Pro provoz běžných strojírenských hydraulických mechanismů se využívá zpravidla minerálních olejů. Vyrábějí se z ropy pomocí operací - rafinace, hydrogenace (chemická reakce, která spočívá v přidání molekuly vodíku na násobnou vazbu za přítomnosti katalyzátorů) a odparafinování až do získání požadovaných vlastností. Jejich výhodou je dobrá mazací schopnost a chemická neutralita vůči povrchům, s kterými jsou ve styku.

Dle normy CETOP RP 91 dělíme minerální oleje do tříd dle výkonnosti:

- HH** - oleje určené pro práci při nižších a středních tlacích a výkonech, kde nejsou kladeny zvýšené požadavky na viskozitu a mazací schopnosti (např. u hydrogenerátorů). Neobsahuje žádné přísady, může být tudíž náchylný k oxidaci.
- HL** - oleje obsahující přísady proti oxidaci a korozi, vyhovují mechanismům se zvýšenými požadavky na termooxidační stálost, ale běžnými nároky na viskozitu a mazání (obvody se škrtkovými ventily při celodenní zátěži, obvody se zubovými hydrogenerátory do 25 MPa, pístovými do 16 MPa).
- HM** - obsahují aditiva proti oxidaci, korozi, pění, pro snížení opotřebení i tvorby emulzí. Oleje jsou určeny pro stroje pracující při vysokých tlacích i teplotách v nechráněném prostředí s požadavkem na kvalitní mazání.
- HV** - vysoce rafinované oleje obsahující přísady proti oxidaci, korozi, pění, pro snížení opotřebení a modifikátor viskozity zlepšující vlastnosti za nízkých teplot. Mají velmi podobné vlastnosti jako minerální oleje třídy HM, liší se jen ve zvýšených požadavcích na malou závislost viskozity na teplotě. Použití např. u mobilních pracovních mechanismů pracujících ve větším rozsahu teplot okolí.

Tabulka 5.2 – Klasifikace minerálních olejů [3]

ISO/DIS 6743/4 CETOP RP 91 H	DIN 51 524	Obsah přísad
HH	-	bez přísad
HL	HL	přísady proti oxidaci a korozi
HR	-	jako HL+modifikátor viskozity
HM	HLP	jako HL+protioděrové přísady
HV	HLPV	jako HM+modifikátor viskozity
HG	-	jako HM+přísady proti „stick-slipu“

Podle DIN se označují doplňujícím písmenem:

HLP - D jako HLP + detergenty (rozpouštědla usazenin) + disperzanty

HLP - M jako HLP + plošší viskózní křivka

HLP - S jako HLP + velmi plochá viskózní křivka

Každá výkonová třída je ještě dále klasifikována dle viskozity na dalších 8 tříd, v praxi se však užívá jen šesti z nich:

ISO VG 10, 22, 32, 46, 68, 100

[1], [3], [5], [6]

5.3 TĚŽKOZÁPALNÉ KAPALINY

Těžkozápalné kapaliny (dle některých zdrojů také nepřesné označení nehořlavé kapaliny, jelikož u emulzí olej-voda může vlivem zvýšené teploty dojít k odpaření složky vody a vznícení oleje) jsou kapaliny anebo směsi kapalin, které nahrazují minerální oleje v zařízeních, pracujících v prostředích, kde hrozí nebezpečí výbuchu nebo požáru. Odolnost vůči hoření způsobují buď chemické příměsi, nebo obsah vody. Nejčastěji se využívají v letectví, slévárenství, hornictví.

Tabulka 5.3 – Vybrané vlastnosti těžkozápalných kapalin [3]

Druh kapaliny	HFA	HFB	HFC	HFD
Odolnost proti hoření	velmi dobré	dobré	velmi dobré	dobré
Hustota	1000	950	1040-1090	1150-1450
Provozní rozsah teplot [°C]	30÷50	30÷50	30÷50	70÷90
Max. rozsah teplot [°C]	3÷55	3÷55	-30÷65	-25÷150
Kinematická viskozita při 40 °C [m ² · s ⁻¹]	1÷2	nestanoveno	20÷70	15÷70
Obsah vody [%]	80÷98	40÷60	35÷60	0
Životnost valivých ložisek v % normální životnosti	5÷10	6÷15	6÷18	50÷100
Cenový index vzhledem k HLP oleji	0,1÷0,25	<2	1,5÷2	2÷5

Kapaliny HFA (emulze olej ve vodě)

Tyto emulze se skládají z více než 80% vody (některé až 95%) a druhé, podstatné složky – syntetického oleje nebo minerálního oleje s emulzními přísadami. Emulze se používá v rozsahu teplot mezi 5-55 °C při pracovním tlaku 10 MPa. Mezi tuzemské výrobky se řadí např. emulgační olej Emulzín H (minerální olej s emulgátory), který se asi při 3% koncentraci používá jako tlaková kapalina v důlních posuvných výztužích, v kovací lisech a pro některé typy vstřikovacích lisů na lehké kovy. Jelikož emulze obsahuje tak vysoké procento vody, je prakticky nehořlavá a zároveň velice levná. Jedinou nevýhodou se může jevit snižující se mazací schopnost se zvyšujícím se obsahem vody (nižší životnost hydrogenerátorů).

Koncentráty na bázi minerálního oleje jsou nerozpustné ve vodě. Za přítomnosti emulgátorů jsme do určité míry schopni vytvořit stabilní emulzi oleje s vodou. Stabilitu ovlivňuje

jak chemické složení vody, tak i vlastnosti oleje. Kritériem pro hodnocení emulzí je např. kyselost emulze (měla by se pohybovat v rozmezí pH 7 až 9), jež se dá upravovat například přidáním sody nebo kalcinované sody. Kromě emulgátorů se do emulzí přidávají též inhibitory koroze, přísady proti pění a baktericidní přísady.

Syntetické koncentráty vytvářejí s vodou při koncentraci 1-2% (max. 10%) mikroemulze. Jsou to koloidní suspenze vysokoviskózních olejových kapek, které se vyznačují vysokou stabilitou. Přestože tyto emulze patří mezi dražší pracovní média, skvěle svoji vysokou cenu vynahrazují vysokou mazivostí a kvalitou.

Kapaliny HFB (emulze voda v oleji)

Tato emulze obsahuje min. 40% vody a používá se při teplotách 5-60°C a tlacích do 16 MPa. Kvůli vyššímu obsahu oleje v emulzi si musíme dávat pozor na velmi omezenou hořlavost (teplota vzplanutí cca při 430°C). Výhodou tohoto typu kapaliny je vysoká mazací schopnost, nízké korozivní účinky (inhibitory koroze) a oxidační stálost. Dnes kapaliny HFB nalézají své využití především v obvodech se zubovými a lamelovými hydrogenerátory, kde je potřeba nižších tlaků a vyžaduje se omezená hořlavost.

Kapaliny HFC (vodní roztoky polymerů)

Jedná se o roztoky vyšších polyetylenglykolů ve 35÷60% vody. Při vyšším obsahu polyglykolu snesou i pracovní teploty v rozsahu -25°C až 60°C při tlaku 16 MPa. Vyznačují se dobrou odolností proti hoření, vysokým viskózním indexem (až 150) a oproti emulzím odpadají problémy se stabilitou roztoků. Nedostatkem se jeví nízká schopnost odvzdušnění, hydraulická zařízení mají tudíž sklony ke kavitaci. Přestože jsme schopni určité vlastnosti (antikorozi apod.) upravit užitím přísad, mazací schopnost roztoku zůstává nízká. HFC kapaliny působí také agresivně na zinek, kůži a běžné typy nátěrů.

Kapaliny HFD (bezvodé syntetické kapaliny)

Jsou to syntetické nehořlavé látky, které se v závislosti na obsahu přísad dají používat i pro vyšší tlaková zatížení. Nejvyužívanějšími zástupci jsou dnes **estery kyseliny fosforečné**, syntetického či přirozeného původu (z dehtování), které jsou i biologicky odbouratelné. Tyto estery mají skvělou mazací schopnost a antikorozi účinky, jsou těžce zápalné a špatně hoří. Jsou také použitelné na poměrně široké škále teplot, konkrétně -20÷150°C. Naopak zakázanými se staly kapaliny na bázi **chlorovaných uhlovodíků** (PCB – polychlorované bifenyly), jelikož jsou karcinogenní. Ojedinele se můžeme setkat i se **silikonovými oleji** (kapalinové tlumiče).

Tyto kapaliny nacházejí své uplatnění především v hydraulice letadel, regulátorech parních turbín, svářecích i důlních strojích aj. [3], [5], [6]

5.4 EKOLOGICKY PŘÍZNIVÉ KAPALINY

V poslední době se klade čím dál větší důraz na ochranu životního prostředí a tato myšlenka dala základ vývoji tzv. **biokapalin**. Již z názvu lze snadno poznat, že jsou pro přírodu nezávadné (nebo minimálně toxické), rychle biodegradovatelné a přesto mají další vlastnosti srovnatelné s předchozími typy pracovních kapalin. **Biodegradaci** můžeme definovat jako schopnost rozložit látku na oxid uhličitý a vodu pomocí působení mikroorganismů.

Hlavním důvodem použití biokapalin je šetrnost k životnímu prostředí v případě havárie v porovnání s minerálními oleji. Můžeme se s nimi setkat v citlivých oblastech při lesních, zemědělských pracích i práci vodních elektráren nebo výstavbě vodních děl. Přestože jsou tyto oleje biologicky odbouratelné, nesmí se vypouštět do půdy ani vod.

Ekologicky příznivé kapaliny jsou rozděleny do 3 skupin:

Kapaliny HETG (rostlinné oleje)

Jsou to kapaliny na rostlinné bázi, přičemž nejčastěji se jedná o řepkový olej. Z chemického hlediska jsou to triglyceridy vyšších mastných kyselin. Výhodou je výborná mazací schopnost a vysoký viskózní index. Mezi jejich přednosti však nemůžeme počítat odolnost vůči oxidaci, proto nikdy nepřekračujeme pracovní teploty nad 70°C (došlo by k rychlé degradaci pracovní kapaliny a vzniku kalů, které by mohly způsobit zalepení částí hydraulického systému). Podléhají hydrolýze, jsou hořlavé. Využití pro ně najdeme především v zemědělské i lesnické hydraulice.

Kapaliny HEPG (polyglykoly)

O této skupině polyglykolů, která je dle starých norem značena zkratkou HPG, jsme se již zmiňovali v Kapitole 5.3 – Těžkozápalné kapaliny. Pro doplnění je vhodné zmínit, že jsou zařazeny do třídy ohrožení vod WGK = 0 (nejsou nebezpečné pro vodu) a jejich biologická rozložitelnost se pohybuje okolo 90%. Mají příznivý průběh viskozity v závislosti na teplotě, dobrou tekutost za nízkých teplot i termooxidační stálost.

Kapaliny HEE (syntetické estery)

Kromě kapalin na bázi esterů bývají do této skupiny řazeny i tzv. chemicky modifikované rostlinné oleje. V mnohém mají však oproti HETG kapalinám navrch. Mají skvělé mazací schopnosti, výborné teplotní i viskozitní vlastnosti, dobře odolávají hydrolýze a jsou termooxidačně stálé. Vlastnosti lze ještě vylepšovat pomocí aditiv. Nepůsobí korozivně, nejsou toxické, jsou velmi dobře biologicky odbouratelné a patří do třídy WGK = 0. [3], [5], [6]

Tabulka 5.4 – Vybrané vlastnosti ekologických kapalin [5]

	řepkový olej	polyglykol	syntetický olej
Kin. viskozita při 40°C [mm ² /s]	34	46	46,1
Kin. viskozita při 100°C [mm ² /s]	7,8	8,2	8,4
Viskozitní index [-]	215	153	191
Bod tuhnutí [°C]	-35	-51	-58
Bod vzplanutí [°C]	250	205	220
Hustota [kg/m ³]	920	1100	920

5.5 OLEJE V LETECTVÍ

Od pracovních médií používaných v letecké dopravě očekáváme především spolehlivost a funkčnost i při vyšší zátěži (vysoká teplota i tlak, maximální průtok). Pro specifikaci nároků na hydraulické kapaliny letadel, byl vypracován následující seznam požadavků:

1. Stejnorodost
2. Mazací schopnost
3. Ohnivzdornost (nezápalnost)
4. Odolnost vůči mechanickým účinkům
5. Mrazuvzdornost (vhodnost jak pro letní, tak i zimní provoz)
6. Antikorozi vlastnosti včetně neutrality k materiálu těsnících manžet
7. Nesmí obsahovat asfaltovité látky, popel, tvrdé či lepkavé příměsi

S ohledem na bezpečnost rozlišujeme mezi pracovními médii určenými pro armádní letadla a pro civilní leteckou dopravu. Až na pár výjimek dnes všechna armádní letadla využívají kapaliny na bázi minerálního oleje známého ve světě jako:

- DTD 585 (Velká Británie)
- MIL-H-5606 (USA)
- H 515 (NATO)
- AIR 320 (Francie)

Používání této kapaliny nám přináší spousty výhod. Je běžně dostupná po celém světě a oproti jiným kapalinám se vyznačuje malou citlivostí na změnu viskozity vlivem změny teploty. Nevýhodou je však hořlavost kapaliny, která omezuje pracovní teploty maximálně do 130°C. V důsledku toho vznikaly úpravy původní verze oleje např. DP 47 (také známý jako Silcodyne), které teplotní použití oleje rozšířil.

Od války ve Vietnamu se letecký průmysl zaměřil především na vývoj pracovní kapaliny se sníženým rizikem vznícení, čímž bylo často ohroženo letadlo především při vzdušných soubojích. Práce vyústila až v představení nového složení, kompletně syntetického média s názvem MIL-H-83282, které se ihned uchytilo například v armádních letadlech US Navy.

Hydraulické soustavy dopravních (komerčních) letadel využívá těchto pracovních kapalin:

- Solutia Skydrol LD-4, Skydrol 500B-4 nebo Skydrol 5
- Exxon Type IV HJ4AP nebo Type V HJ5MP

Tato média jsou fosfátového esterového původu, nejsou ohnivzdorná a může se stát, že by se malý objem kapaliny od žhavých povrchů vznítit. Kapaliny bývají testovány, abychom si ověřili spolehlivost o jejich nehořlavosti a bodu vznícení. [1], [14]

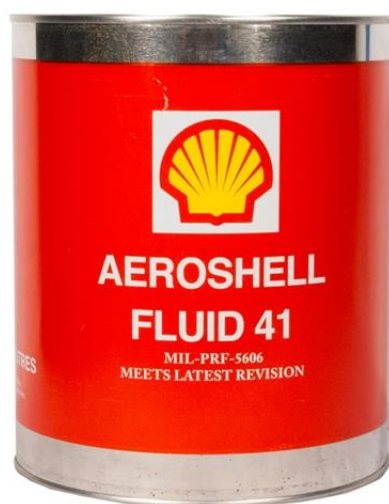
AEROSHELL FLUID 41

AeroShell Fluid 41 je v dnešní době jedním z nejpoužívanějších médií na bázi minerálního oleje pro provoz hydraulických systémů letadel. Používá se převážně tam, kde je požadována vysoká čistota oleje a tekutost i při nižších teplotách. Vyznačuje se také mimořádnou odolností proti opotřebení, oxidační stálostí a stříhovou stabilitou oleje.

Tento typ minerálního oleje používáme za pracovních teplot:

- bez tlaku (-54°C až 90°C)
- s tlakem (-54°C až 135°C)

AeroShell Fluid 41 je produktem společnosti Shell a poznáme jej dle červeného zbarvení. Měl by být využíván v systémech, kde se využívá výhradně syntetického těsnění (na přírodní kaučuk má negativní vliv). Je kompatibilní s hydraulickými kapalinami AeroShell Fluid 4, 31, 51, 61, 71 a SSF/LGF. [16]



Obrázek 5.1 - Plechovka oleje AeroShell Fluid 41 o objemu 1 galonu [16]

AMG-10

Za analogií ruského původu k předchozímu oleji AeroShell Fluid 41 by se dal považovat olej AMG-10. Jeho základová složka se vyznačuje nízkou viskozitou a nízkým bodem tuhnutí, ta je míchána se zahušťovacím činidlem a antioxidačními příměsemi. Vlivem kvalitního zpracování je olej schopen pracovat v širokém pásmu teplot (-60°C až 55°C).

Výhody hydraulického oleje AMG-10 pro využití v letectví:

- minimální změna viskozity v širokém rozsahu teplot
- nízký bod tuhnutí
- vysoká mechanická stabilita
- prodloužená životnost
- vysoce kvalitní filtrace [17]

6 VÝBĚR LABORATORNÍHO VYBAVENÍ

V této kapitole se budeme zabývat výběrem vhodných, běžně dostupných měřicích přístrojů pro zkoumání parametrů hydraulických kapalin. Tyto přístroje jsou voleny s ohledem na měřicí rozsah, přesnost měření, teplotní rozsah a také cenu bez DPH (DPH je 21%).

6.1 VOLBA VISKOZIMETRU

6.1.1 HÖPPLER C

Jak už můžeme vytušit z názvu, jedná se o kuličkový Höpplerův viskozimetr. Přístroj Höppler C je výrobek společnosti HAAKE (Haake Technik GmbH) původem z Německa, která se mimo jiné zabývá hydraulikou a měřicími přístroji. Tento přístroj dále prodává mezi laboratoře společnost s názvem Thermo Fisher Scientific, jejíž webové stránky jsem navštívil.

Přístroj splňuje nároky norem DIN 53015 i ISO 12058. Součástí balení jsou 3 skleněná a 3 kovová tělíska (kuličky) různých průměrů, skleněný teploměr, čisticí potřeby, kalibrační tabulka a obal. [22]

Tabulka 6.1 – Parametry viskozimetru Höppler C [22]

Technická data	
Rozsah použití	$0,5 - 10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
Teplotní rozsah	$-20 \dots + 150 \text{ }^\circ\text{C}$
Přesnost	1%
Cena	62 930, –



Obrázek 6.1 - Viskozimetr Höppler C [22]

6.1.2 SV-10

Dalším přístrojem je vibrační viskozimetr SV-10 vyrobený japonskou společností A&D Company Limited specializující se na výrobu lékařských a měřicích přístrojů. V České republice je A&D Company zastoupena obchodní společností vystupující pod názvem HELAGO.

SV-10 pracuje na principu vibrační metody, umožňuje nám tudíž měřit s vysokou přesností, v širokém rozsahu hodnot a bez nutnosti výměny snímacích částí. Přístroj je schopen měřit newtonské i nenewtonské kapaliny, pěnové i pěnivé vzorky, dokonce i tekoucí, včetně vzorků v turbulentním proudění. Jeho snímače rezonují při konstantní frekvenci 30 Hz a amplitudě nižší než 1 mm, dokáže měřit i teplotu kapaliny a hodnoty zobrazovat na displayi, to vše v reálném čase. [23]

Tabulka 6.2 – Parametry viskozimetru SV-10 [23]

Technická data	
Rozsah použití	0,3 – 10 ⁴ mPa · s
Teplotní rozsah	0 – 160 °C
Přesnost	1%
Cena	143 500, –



Obrázek 6.2 - Vibrační viskozimetr SV-10 [23]

6.1.3 HÖPPLER KD 3.1

Posledním přístrojem, který rozhodně stojí za zmínku, je rheo-viskozimetr Höppler KD 3.1. Jeho předností je opravdu velký měřicí rozsah, schopnost měřit i nenewtonské kapaliny a schopnost vykreslit průběhovou křivku v závislosti na čase nebo konzistenci. Jeho konstrukce (kulička protlačovaná ocelovou tyčí do kapaliny) umožňuje měřit polohu kuličky i v neprůhledných kapalinách. [23], [24]

Tabulka 6.3 – Parametry viskozimetru Höppler KD 3.1 [24]

Technická data	
Rozsah použití	$1 - 2 \cdot 10^9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
Teplotní rozsah	$-60 \dots + 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Přesnost	$1 - 2 \%$
Cena	266 080, –



Obrázek 6.3 - Höppler KD 3.1 [24]

6.1.4 ZHODNOCENÍ

Na základě předchozích dat můžeme soudit, že pro běžné laboratorní měření a srovnávání viskozit si vystačíme v přístrojem Höppler C. Jeho měřicí rozsah je dostačující a cena velmi uspokojivá. Za nevýhody můžeme považovat užití tělískové metody, která v závislosti na velikosti tělísek ovlivňuje přesnost měření, nemožnost měření nenewtonských kapalin a měření v reálném čase.

Přesto bych rád vyzdvihl přístroje SV-10 a Höppler KD 3.1, které jsou kvalitnějšího provedení. Höppler KD 3.1 se vyznačuje především svým enormním rozsahem měření, zato vibrační viskozimetr SV-10 potěší vysokou přesností při měření zejména méně viskózních kapalin a nezatíží rozpočet tak vysokou částkou, za jakou bychom pořídili rheo-viskozimetr Höppler KD 3.1. Jelikož jsou oba přístroje schopny pracovat s neneutonskými kapalinami a považují rozsah vibračního viskozimetru za dostatečný, přikláním se k volbě viskozimetru SV-10, jako nejvhodnějšímu přístroji k měření viskozity ze zde uvedených typů přístrojů.

Tabulka 6.4 – Souhrn parametrů přístrojů měřících viskozitu [22], [23], [24]

Název přístroje	Höppler C	SV-10	Höppler KD 3.1
Rozsah použití	$0,5 - 10^5 \text{ mPa} \cdot \text{s}$	$0,3 - 10^4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$	$1 - 2 \cdot 10^9 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
Teplotní rozsah	$-20 \dots + 150 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 - 160 \text{ }^\circ\text{C}$	$-60 \dots + 200 \text{ }^\circ\text{C}$
Přesnost	1%	1%	1 – 2 %
Cena	62 930, –	143 500, –	266 080, –

6.2 VOLBA HUSTOMĚRU

6.2.1 LABORATORNÍ HUSTOMĚR

Přestože by se mohly hustoměry zdát alespoň po stránce konstrukční velice jako primitivní nástroje, opak je pravdou. Pořizují se většinou po celých sériích, každý hustoměr měří v úzkém rozsahu hodnot, a proto se vyznačují i vysokou přesností měření.

Jelikož se většina hydraulických kapalin používaných u letadel pohybuje v rozmezí $800 - 900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, ve výjimečných případech jako jsou speciální nehořlavé oleje, se pohybuje hustota až okolo $1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Proto jsem vybral 3 hustoměry distribuované společností HELAGO, každý o jiném rozsahu měření, určené pro zkoumání ropy a výrobků z ropy. [25]

Tabulka 6.5 – Parametry hustoměrů č. 1 [25]

Technická data	
Rozsah použití	$830 - 890 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplotní rozsah	$-10 \dots + 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Přesnost	$0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Cena	1010, –

Tabulka 6.6 – Parametry hustoměrů č. 2 [25]

Technická data	
Rozsah použití	$760 - 880 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplotní rozsah	$-10 \dots + 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Přesnost	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Cena	757, –

Tabulka 6.7 – Parametry hustoměrů č. 3 [25]

Technická data	
Rozsah použití	$870 - 990 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Teplotní rozsah	$-10 \dots + 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Přesnost	$1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Cena	706, –



Obrázek 6.4 - Hustoměr [25]

6.2.2 DENSITO 30PX

Dalším, tentokrát už automatických přístrojem na měření hustoty je Densito 30PX vyrobený jedním z předních světových lídrů ve výrobě měřicích přístrojů. Přístroj pracuje na principu oscilující duté skleněné trubičky. Po naplnění trubičky vzorkem kapaliny se změní frekvence oscilace, čím větší hmotnost má vzorek, tím méně bude trubička oscilovat. Přístroj změří frekvenci a na základě toho vyhodnotí hustotu nebo koncentraci.

Densito 30PX je vybaven digitálním displayem, pumpou s regulovanou rychlostí nasávání i otvorem pro vstřík vzorku externí stříkačkou (např. pro velmi viskózní vzorky). Jeho výhodou je velký rozsah měření, paměť až na 1100 výsledků a schopnost teplotní kompenzace. [26]

Tabulka 6.8 – Parametry přístroje Densito 30PX [26]

Technická data	
Rozsah použití	0 – 2000 kg · m ⁻³
Teplotní rozsah	0 ... + 40 °C
Přesnost	1 kg · m ⁻³
Cena	56 166, –



Obrázek 6.5 - Densito 30PX [26]

6.2.3 ZHODNOCENÍ

Ve volbě vhodného přístroje na měření hustoty hrají vliv především parametry jako přesnost měření hustoty i teploty, rozsah teploty a cena přístroje. Přestože má přístroj Densito 30PX všechny vlastnosti na stejné nebo mírně lepší úrovni než sada hustoměrů, přikláním se více ke koupi sady hustoměrů z důvodu bezkonkurenčně nejnižší ceny (celkem 2 473,- bez DPH). Domnívám se, že by jejich přesnost i rozsahy měření měly být přinejmenším vyhovující pro měření hydraulických olejů letadel.

Tabulka 6.9 – Souhrn parametrů přístrojů měřících hustotu [25], [26]

Název přístroje	Hustoměr č. 1	Hustoměr č. 2	Hustoměr č. 3	Densito 30PX
Rozsah použití *	830 – 890	760 – 880	870 – 990	0 – 2000
Teplotní rozsah	–10 ... + 50 °C	–10 ... + 50 °C	–10 ... + 50 °C	0 ... + 40 °C
Přesnost	0,5 kg · m ⁻³	1 kg · m ⁻³	1 kg · m ⁻³	1 kg · m ⁻³
Cena	1010, –	757, –	706, –	56 166, –

*hodnoty rozsahu použití v jednotkách [kg · m⁻³]

6.3 VOLBA PŘÍSTROJE NA MĚŘENÍ ZNEČIŠTĚNÍ KAPALIN

6.3.1 FCU 2010

Fluidní jednotka FCU 2010 je přístroj na stanovení množství a velikostí nečistot obsažených v oleji. V České republice jsou tyto přístroje zastoupeny v obchodním katalogu společnosti RECOMA z Blanska. Přístroj je schopen v průběhu provozu vyhodnotit třídu znečištění kapaliny a stanovit ji dle norem ISO nebo NAS. Naměřené výsledky ve formě grafů a tabulek si můžeme také vytisknout pomocí zabudované tiskárny.

Přístroj funguje na principu metody snížení intenzity světla a za jeho hlavní výhodu můžeme považovat jeho on-line nasazení a okamžitý a přesný výsledek týkající se měření znečištění. [30]

Tabulka 6.10 – Parametry přístroje FCU 2010 [30]

Technická data	
Maximální tlak	0 – 350 bar
Rozsah viskozity	5 – 350 mm ² /s
Rozsah teploty	0 ... + 70 °C
Doba měření	40-120 s
Cena	–

Tabulka 6.11 - Měřicí hodnoty displaye [30]

NAS 5-15 μm	třídy 2 - 12
NAS 15-25 μm	třídy 4 - 12
NAS 25-50 μm	třídy 6 - 15
NAS > 50 μm	třídy 6 - 15
ISO	třídy 10/9 – 24/21



Obrázek 6.6 - Model FCU 2010 [31]

6.3.2 SPECTRO LNF Q200

Přístroj Spectro LNF Q200 je kombinovaný analyzátor na vyhodnocení dat o velikosti a počtu znečišťujících částic v kapalině a také její viskozity. Třídy nečistoty mohou být zpracovány dle norem ISO, NAS i NAVAIR.

Jeho značnou výhodou je jeho pevná, ač objemově skromná konstrukce a velké měřicí rozsahy se zachováním přesnosti měření, např. nejvyšší limit saturace je 5 000 000 částic/ml kapaliny s chybou < 2%. [32]

Tabulka 6.12 – Parametry přístroje Spectro LNF Q200 [32]

Technická data	
Velikost částic	4 – 100 μm
Rozsah viskozity	5 – 350 mm^2/s
Limit saturace	5 000 000 částic/ml
Cena	—



Obrázek 6.7 - Spectro LNF Q200 [32]

6.3.3 OPCOM II

Kvalitním měřicím přístrojem je i výrobek společnosti ARGO-HYTOS s.r.o. Společně se svojí sesterskou společností v Německu vyrábějí hydraulická zařízení a dnes i měřicí přístroje na měření parametrů hydraulických soustav.

Jejich výrobek OPCom II se konstrukčně liší od dvou předchozích příkladů zejména tím, že je to snímač, musí být tedy použit přímo v hydraulickém obvodu. Pomocí principů metody světelného rozptylu vyhodnocuje úroveň znečištění kapaliny, výstupem je údaj o počtu částic v jednotlivých velikostních skupinách dle ISO 4406. [33]

Tabulka 6.13 – Parametry přístroje OPCom II [33]

Technické údaje	
Velikost část	4 – 21 μm
Maximální tlak	420 bar
Rozsah viskozity	5 – 1000 mm^2/s
Přesnost měření	1 třída ISO 4406
Průtok	50 – 400 ml/min
Cena	—



Obrázek 6.8 - OPCom II [33]

6.3.4 ZHODNOCENÍ

Z uvedených údajů můžeme soudit, že nejvíce informací nám zdroje poskytly o přístrojích FCU 2010 a OPComII, přesto žádný ze zdrojů neuvedl cenu přístroje. Rozhodující pro výběr bude tedy přístrojem měřitelná velikost částic, maximální tlak a rozsah viskozity kapaliny, s kterým přístroj umí pracovat.

OPCom II se jeví kvalitním snímačem hydraulických obvodů, překvapivá je jeho použitelnost i za vysokých viskozit kapalin a tlaků až 420 bar. Méně uspokojivé je však samotné měření částic, jelikož snímá nečistoty v rozsahu velikost pouze od 4 do 21 μm .

Přestože přístroj Spectro LNF Q200 disponuje opravdu skvělou škálou měřitelnosti částic i velkým limitem saturace, přikláním se k volbě přístroje FCU 2010, protože o Spectro LNF Q200 víme jen velmi málo dalších informací. FCU 2010 je dle svých parametrů kvalitním měřicím přístrojem pro použití v laboratoři, tak i pro servisní měření venku.

Tabulka 6.14 – Souhrn parametrů přístrojů měřících znečištění kapalin [31], [32], [33]

Název přístroje	FCU 2010	Spectro LNF Q200	OPCom II
Rozsah velikosti částic	4 – 50(+) μm	4 – 100 μm	4 – 21 μm
Rozsah viskozity	5 – 350 mm^2/s	5 – 350 mm^2/s	5 – 1000 mm^2/s
Maximální tlak	350 bar	–	420 bar

7 ZÁVĚR

Cílem mé práce bylo definovat všechny známé měřitelné parametry hydraulických kapalin, popsat přístroje a metody, kterými se parametry měří a provést rozvalu nad výběrem vhodných přístrojů, které jsou dnes k zakoupení na trhu, jako vybavy laboratoře na měření hydraulických kapalin. Z důvodu úplného uvedení čtenáře do problematiky a návaznosti informací, jsem připojil ještě kapitoly zabývající se hydraulickými kapalinami a hydraulickými soustavami.

V první části práce byly definovány všechny měřitelné či matematicky řešitelné parametry hydraulických soustav. Parametry byly rozděleny do dvou skupin na fyzikální a chemické, a byl kladen důraz na popsání vlivu parametru na fungování a chod hydraulických zařízení letadel.

Navazující třetí část měla za cíl popis přístrojů a metod měření již zmíněných parametrů z předchozí části. Tato část byla hlavním tématem této práce, a proto je nejrozsáhlejší.

Následující kapitola je věnována hydraulickým soustavám letadel. Společně se schématickým obrázkem byly zmíněny všechny hydraulické aplikace letadel a části hydrauliky, které k své činnosti hydraulické energie využívají. Jelikož nebylo cílem podrobně popsat všechna zařízení hydraulických soustav, volil jsem hydrogenerátor, kvůli jeho nepostradatelnosti v provozu, jako jejich zástupce a popsal jeho existující varianty.

Dále se práce zabývá hydraulickými kapalinami. Byly zmíněny požadavky na hydraulické kapaliny používané v letectví a popsány všechny skupiny kapalin, které se obecně používají pro provoz hydraulických zařízení. Důležitou částí je podkapitola věnovaná olejům užívaných v letadlové dopravě.

Poslední část mé práce by se dala považovat za část praktickou. U významných parametrů hydraulických kapalin jsem vybral 2-3 přístroje, jež jsme schopni reálně zakoupit, zmínil jsem výrobce, případně i českého prodejce či obchodního zástupce, vyzdvihl jsem silné stránky přístroje i jeho příslušenství a vypracoval tabulku technických údajů. Na závěr tyto přístroje byly zhodnoceny s ohledem na přesnost přístroje, měřicí rozsah, teplotní rozsah a cenu, a byl zvolen nejvhodnější zástupce do inventáře laboratoře na měření hydraulických parametrů kapalin.

Jako přínos mé práce bych považoval sumarizaci všech důležitých informací z problematiky hydraulických kapalin a jejich měření za použití kvalitních zdrojů kvalifikovaných českých i zahraničních autorů. Práce může sloužit jako stavební kámen pro chemické laboranty, studenty hydromechaniky, konstruktéry hydraulických zařízení i samotných letadel. Jednou z možností rozšíření mé práce v budoucnu by mohl být konstrukční návrh hydraulické soustavy konkrétního typu letadla či posouzení vlastností u hydraulických kapalin s neznámými vlastnostmi.

V současné době tvoří hydraulické prvky stále primární část přenosu síly při ovládání letadel. Často jsou kombinovány s přístroji elektronickými, společně tvoří celky s názvem elektrohydraulické systémy, kde elektronická část řídí soustavu a hydraulická zajišťuje přenos sil

(mechanický pohyb). Jelikož hydraulika vykazuje skvělé výsledky především v ohledech přenosu energie a spolehlivosti než elektronické, případně pneumatické systémy, předpokládám, že budou dále využívány i v budoucnu.

8 ZDROJE

- [1] PIVOŇKA, Josef. *Tekutinové mechanismy*. Praha: SNTL, 1987, 623 s
- [2] BAŠTA, Trifon Maksimovič. *Hydraulická zařízení v letadlech*, Státní nakladatelství technické literatury, 1957
- [3] PAVLOK, Bohuslav. *Hydraulické prvky a systémy 1. díl*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1999. 158 s. ISBN 80-7078-620-5.
- [4] PULLER, Tomáš. *Hydraulické soustavy letadel*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2009.
- [5] DVOŘÁK, Lukáš. *Vlastnosti tekutin*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní, 2009.
- [6] GRINČ, Ladislav. *Pracovné kvapaliny pre hydraulické systémy: druhy, filtrácia a ekologické aspekty*. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1994. ISBN 80-2100-234-7
- [7] HOLUBOVÁ, Renata. *Základy reologie a reometrie kapalin*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2014. Studijní opora. ISBN 978-80-244-4178-8.
- [8] BENČALÍK, Karol. *Diagnostika hydraulických soustav letadel*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
- [9] JANALÍK, Jaroslav. *Viskozita tekutin a její měření*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Fakulta strojní, 2010.
- [10] SMOLEK, Jan, 2012. *Kontrola a měření strojních zařízení* [online]. Brno: SPŠ a VOŠT Brno [cit. 2017-05-24]. Dostupné z http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_24-02.pdf
- [11] JANUŠ, Petr. *Nejistoty měření dynamické viskozity*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Frk, Ph.D.
- [12] *Měření hustoty*. VOŠZ a SZŠ Hradec Králové [online] Laboratorní technika, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://lat.zshk.cz/vyuka/mereni-hustoty.aspx>
- [13] *Archimédův zákon*. [online]. Učitel.NET. 2010 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.ucitel.net/fyzika/archimedu-v-zakon>
- [14] MOIR I., SEABRIDGE A.: *Aircraft Systems, Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration* John Wiley & Sons, Ltd 2007

- [15] VOJÁČEK, Antonín. *Principy průmyslových čerpadel – 1.díl – zubová čerpadla* [online]. automatizace.HW.cz, 1997 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-1dil-zubova-cerpadla>

- [16] AeroShell Fluid 41 Mineral Hydraulic Oil (1 Gallon Cans). *AirplaneOil.com - The most affordable aviation oil and grease on the web* [online]. Copyright © [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: https://www.airplaneoil.com/AeroShell_Fluid_41_Mineral_Hydraulic_Oil_p/aerofluid-41-1-gal.htm

- [17] AMG-10 - Lukoil. *Lukoil* [online]. Copyright ©2015 [cit. 24.05.2017]. Dostupné z: <http://lukoil-lubricants.com/products/special/aviaoils/00127/>

- [18] SEJKOROVÁ, Marie. *Jaké hodnoty jsou sledovány při tribologické analýze oleje?* rostlinnyolej.cz [online]. Europecon. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.rostlinnyolej.cz/cs/bypassove-filtry/3.html>

- [19] Stanovení čísla kyselosti u rostlinných tuků a olejů. *vfu.cz* [online]. Veterinární a farmaceutická univerzita Brno, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: www.vfu.cz/inovace-bc-a-./pub./h2bsv-stanoveni-cisla-kyselosti-zs-14-15.doc

- [20] NĚMEC, Pavel a Pavel BUREŠ. *Měření čistoty hydraulických kapalin*. mmspektrum.com [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/mereni-cistoty-hydraulickych-kapalin.html>

- [21] TOTTEN, George E. *Tribology of Hydraulic Pump Testing*. West Conshohoken: American Society for Testing and Materials, 1997. ISBN 0-8031-2422-8.

- [22] Viskozimetr kuličkový Höppler C. *Fisherscientific* [online]. Fisher Scientific, 2012 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.thermofisher.cz/produkty/viskozimetr-kulickovy-hoppler-c>

- [23] SV-10 - Viskozimetr vibrační. *HELAGO* [online]. HELAGO-CZ s. r. o: Fisher Scientific, 2016 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/eshop-sv-10-viskozimetr-vibracni-128005.html>

- [24] Viskozimetr Höppler KD 3.1. *Fisherscientific* [online]. Fisher Scientific, 2012 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.thermofisher.cz/produkty/viskozimetr-hoppler-kd-3-1>

- [25] Viskozimetr kuličkový Höppler KD 3.1. *VERKON* [online]. VERKON s.r.o., 2009 - 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/viskozimetr-kulikovy-hoppler-kd-3-1>
- [26] Hustoměry digitální. *VERKON* [online]. VERKON s.r.o., 2009 - 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.verkon.cz/hustomery-prenosne/>
- [27] Lubrication pumps. *Parker Haffinin Corp* [online]. Copyright ©. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.parker.com/portal/site/PARKER/menuitem.de7b26ee6a659c147cf26710237ad1ca/?vgnextoid=fcc9b5bbec622110VgnVCM10000032a71dacRCRD&vgnextdiv=&vgnextcatid=2676290&vgnextcat=LUBRICATION%20PUMPS&vgnextfmt=EN>
- [28] Povrchový film nerozpustné látky na kapalině. *Http://cis.vscht.cz/* [online]. VŠCHT Praha: Centrum informačních služeb VŠCHT Praha, 2014 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/povrchovy_film_neroypustne_latky_na_kapaline.html
- [29] Coulometer WTD pro stanovení vody a čísla kyselosti. *Diram.cz* [online]. Praha: Diram, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.diram.cz/wp-content/uploads/CoulometerWTDKOHv3.pdf>
- [30] MALACH, Miroslav. *Čítač nečistot oleje*. *recoma.cz* [online]. Blansko: RECOMA, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.recoma.cz/citac-necistot-oleje>
- [31] Přístroje pro měření znečištění. *HYDAC* [online]. Hydac spol. s r.o, 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.hydac.com/cz-cs/vyroby/merici-zobrazovaci-analyticke-pristr/merici-pristroje/pristroje-pro-mereni-znecisteni/show/Download/index.html>
- [32] Řada Spectro LNF Q200. *SPECTRO CS* [online]. SPECTRO CS, spol. s r.o., 2011 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.spectro.cz/store/spectro-q200-lnf-new-cze.pdf>
- [33] Monitor částic OPCom. *ARGO-HYTOS* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://www.argo-hytos.com/fileadmin/user_upload/Katalog_OPCom_CZ.pdf
- [34] VOJÁČEK, Antonín. In: *Principy průmyslových čerpadel – 5.díl - rotační pístová čerpadla* [online]. *automatizace.HW.cz*, 1997 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/principy-prumyslovych-cerpadel-5dil-rotacni-pistova-cerpadla>